



Marcos André Santos da Cunha

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Análise de um processo de colagem de duas peças de
aço estampadas e propostas de melhoria**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova
de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa.

Arguentes: Doutor João Manuel Vicente Fradinho, Professor Auxiliar
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa;

Engenheiro David Miguel Cavaco Henriques, Engenheiro
Mecânico – Engenheiro de Processo, BENTELER

Vogal: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado
da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2018

Marcos André Santos da Cunha

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Análise de um processo de colagem de duas peças de aço
estampadas e propostas de melhoria**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova
de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Setembro 2018

O autor não segue as normas do novo Acordo Ortográfico

Análise de um processo de colagem de duas peças de aço estampadas e propostas de melhoria

Copyright © Marcos André Santos da Cunha, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço profundamente ao orientador desta dissertação Professor António José Freire Mourão, por toda a dedicação, paciência, conselhos e orientação, sem os quais jamais teria sido possível a realização deste trabalho.

Agradeço também ao Diogo Oliveira e ao David Henriques que tão bem souberam partilhar os seus vastos conhecimentos em Engenharia, ao Ricardo Moreira pelas suas recomendações, bem como a todos aqueles que da melhor maneira me receberam e ajudaram a na Empresa.

Agradeço ainda à Empresa a oportunidade que me foi dada de me inserir num contexto industrial tão desafiante e que me permitiu aprender tanto com todos aqueles que lá trabalham.

Dedico este trabalho e agradeço aos meus pais, irmão e à Leonor pelo seu amor e apoio durante o curso.

Resumo

Na indústria o processo de colagem de peças de chapa metálicas é utilizado por vezes como complementar, usualmente associado à soldadura por pontos. O presente estudo tem como objetivo analisar o processo de montagem de um conjunto constituído por cinco componentes metálicos sujeitos a dois tipos de ligações: soldadura por pontos e colagem. No processo em questão existe uma dispersão do material adesivo da zona alvo para zonas críticas, ou seja, a cola vai para zonas além das especificadas no projecto. Através da análise da documentação disponível e da comparação com os valores do material adesivo depositado, propuseram-se melhorias ao processo de colagem de modo a reduzir o excesso de cola nas zonas críticas melhorando o processo.

As especificações quanto ao volume depositado e a área a preencher colidem com as tolerâncias geométricas ao imporem uma distância entre componentes igual para todas as áreas coladas, não obstante a possibilidade de os valores de espaçamento poderem variar. Em todos os três cordões de cola depositada analisados o volume é mais de duas vezes superior ao especificado. Em dois dos cordões tal facto não manifesta ser um problema. No outro cordão as tolerâncias geométricas e a geometria da região associadas dificultam a repetibilidade do processo de deposição de cola. Realizaram-se assim três propostas de intervenção que visam minimizar as dificuldades existentes ao longo do processo de colagem: redução do volume de adesivo depositado, redefinição de parte do trajeto de um dos cordões e reformulação do processo de validação através da implementação de um ensaio não-destrutivo. Os resultados mostraram uma melhoria significativa no processo.

Palavras-chave: colagem, soldadura por pontos, aço alta resistência, aço galvanizado, toleranciamento geométrico

Abstract

In industry the adhesive bonding process of metal sheets parts is sometimes used as complementary, usually associated with spot welding. The present study's goal is to analyse the assembling process of a set of five metallic parts which are exposed to two types of bonding: spot welding and adhesive bonding. Throughout this specific process there is a spreading of adhesive material from the target zone to critical areas, that is, the adhesive material spread beyond the areas specified in the project. Through the analysis of the available documentation and comparison with the values of the deposited adhesive material, improvements were proposed to the adhesive bonding process to reduce the excess glue in the critical zones, improving the process.

The specifications for the deposited volume and the area to be filled collide with the geometric tolerances by imposing a distance between components for all bonded areas, notwithstanding the possibility that spacing values may vary. In all three cords of deposited adhesive analysed the volume is more than twice the one specified. In two of the cords this does not appear to be a problem. In the other cord the geometric tolerances and the geometry of the associated region hinder the repeatability of the adhesive deposition process. Thus, three intervention proposals are made, aiming to minimizing difficulties during the bonding process: reduction of the deposited adhesive volume, redefinition of part of the path of one of the cords and reformulation of the validation process through a non-destructive test. Results have shown a significant improvement in the process.

Key-words: adhesive bonding, spot welding, high-strength steel, galvanized steel, geometric tolerancing

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Metodologia	1
1.3 Estrutura do documento	1
1.4 Breve síntese de processos de produção	2
2 Caracterização do Processo	7
2.1 Descrição do processo	7
2.2 Problemática.....	14
2.3 Especificações e considerações relevantes	15
2.3.1 Tolerâncias geométricas	15
2.3.2 Volume de adesivo e área de colagem	22
3 Estado inicial e comparação com especificações	23
3.1 Estado inicial	23
3.1.1 Análise indirecta ao cordão K1	23
3.1.2 Análise indirecta ao cordão K2.....	25
3.1.3 Análise indirecta ao cordão K3.....	27
3.2 Análise dimensional dos componentes.....	29
3.2.1 Análise dimensional à zona de deposição do cordão K1.....	31
3.2.2 Análise dimensional à zona de deposição do cordão K2.....	34
3.2.3 Análise dimensional à zona de deposição do cordão K3.....	36
4 Propostas e intervenção.....	41
4.1 Redução do volume de adesivo depositado	41
4.2 Redefinição de parte do trajecto do cordão K3.....	47
4.3 Reformulação do processo de validação do lote produzido	48
5 Conclusão e estudos futuros	53
6 Referências	55

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Classificação dos processos de produção (Adaptado de [2])	3
Figura 1.2 - Exemplos de tipos de processos de colagem (1) estrutural, (5) estabilizadora, (2) <i>anti-flutter</i> (Adaptado de [4]).....	4
Figura 1.3 - Fluxograma de acontecimentos.....	6
Figura 2.1 - Desenho 2D do exterior do conjunto com as zonas de deposição de material adesivo assinaladas (a deposição é nas zonas assinaladas mas no interior), vista de frente	8
Figura 2.2 - Pormenor 2D (a tracejado) da região a garantir adesivo no componente principal na zona de- contacto com: a) base do reforço interior (K1); b) lateral do reforço interior (K2); c) lateral do reforço interior com furo (K3).	9
Figura 2.3 - Cordões de deposição de material adesivo com disposição a) em “8” (K1); b) em “espiral” (K2); c) em “H” (K3).....	10
Figura 2.4 - Pontos de soldadura na zona lateral do conjunto que tem o furo roscado na zona com adesivo (K3)	11
Figura 2.5 - Detalhe das diferentes zonas do conjunto onde existe encosto entre o reforço interior e o componente principal (3D em corte) com a correspondente zona assinalada também no desenho do reforço interior (2D vista de frente); a vermelho os pontos de soldadura	12
Figura 2.6 - Fluxograma do processo inicial	13
Figura 2.7 - Pormenor da tolerância de deposição de adesivo no furo roscado da zona lateral do conjunto (K3)	14
Figura 2.8 - Pormenor da zona exterior da base do componente principal (K1)	16
Figura 2.9 - Pormenor da zona lateral do componente principal com dupla furação aproximadamente quadrangular	17
Figura 2.10 - Pormenor da zona exterior da base do reforço interior com furação dupla	17
Figura 2.11 - Pormenor da zona lateral do reforço interior com dupla furação quadrangular	18
Figura 2.12 - Pormenor da zona com furação roscada na lateral do conjunto, vista de topo e em corte.....	18
Figura 2.13 - Pormenor da zona de dupla furação na base do conjunto, vista de topo e em corte	19
Figura 2.14 - Pormenor da zona lateral do reforço interior com a rosca fêmea, vista de topo e em corte.....	20
Figura 2.15 - Pormenor da zona lateral do conjunto na condição limite de tolerância geométrica de coaxialidade de 1 mm entre o eixo da rosca e o eixo do furo do componente principal e na situação limite de montagem, vista de topo e em corte	20
Figura 2.16 - Pormenor da zona base do reforço interior com furação dupla e rosca hexagonal soldada, vista de topo e em corte	21
Figura 2.17 - Pormenor da zona base do conjunto na condição limite de tolerância geométrica de coaxialidade de 1 mm entre o eixo da rosca hexagonal e o eixo do furo do componente principal e na situação limite de montagem, vista de topo e em corte	22

Figura 3.1 - Imagem do cordão K1 cozido	24
Figura 3.2 – Esquema aproximado do formato do cordão K1: a) pré-montagem; b) pós-montagem; c) comparação entre os casos anteriores	25
Figura 3.3 - Imagem do cordão K3 cozido	26
Figura 3.4 - Imagem do cordão K3 cozido	27
Figura 3.5 - Esquema aproximado do formato do cordão K3: a) pré-montagem; b) pós-montagem; c) comparação entre os casos anteriores	28
Figura 3.6 - Reprodução do perfil em estudo, de forma simplificada, uma secção de 1 mm do conjunto na condição nominal.....	30
Figura 3.7 – Vista de frente do conjunto com a zona de deposição de material K1 com furo duplo a traço oblíquo.....	31
Figura 3.8 - Vista lateral do conjunto com a zona de deposição de adesivo K3 sem furo a traço oblíquo.....	34
Figura 3.9 - Vista lateral do conjunto com a zona de deposição de adesivo com furo simples a traço oblíquo.....	37
Figura 4.1 - Imagem do cordão K1 cozido após ajuste	42
Figura 4.2 - Imagem do cordão K2 cozido após ajuste	45
Figura 4.3 - Imagem do cordão K3 cozido após ajuste	45
Figura 4.4 - Esquematização da translação do troço do cordão K3, a vermelho o novo troço 145 47	
Figura 4.5 - Fluxograma do processo actual.....	51

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Tabela descritiva de todas as operações do processo	9
Tabela 2.2 - Volume de adesivo e área de colagem especificados no desenho de conjunto para cada zona de colagem	22
Tabela 3.1 - Comparação entre volume especificado pelo desenho de conjunto e volume calculado por aproximação	28
Tabela 3.2 – Exemplo das situações limite de montagem para uma hipotética secção de 1 mm de comprimento.....	30
Tabela 3.3 – Valores de espaçamento entre componentes na região de colagem com furo duplo	32
Tabela 3.4 - Comparação de volumes de "gap", de cola especificada no desenho de conjunto e de cola aproximadamente depositada para o caso do cordão K2	33
Tabela 3.5 - Valores de gap entre componentes na região de colagem sem furação	35
Tabela 3.6 - Comparação de volumes de "gap", de cola especificada no desenho de conjunto e de cola aproximadamente depositada para o caso do cordão K2	36
Tabela 3.7 - Valores da distância entre componentes no plano do eixo vertical do furo	38
Tabela 3.8 - Volume teórico de espaçamento entre componentes na região de colagem K3	40
Tabela 4.1 - Quantidade de material depositado na semana W.....	42
Tabela 4.2 - Quantidade de material depositado em K1 na semana W+2	43
Tabela 4.3 - Quantidade de material depositado em K2 na semana W+2	44
Tabela 4.4 - Quantidade de material depositado em K3 na semana W+2	46
Tabela 4.5 – Análise da taxa de preenchimento da região de colagem do cordão K3	49

1 Introdução

1.1 Objetivo

A presente dissertação pretende estudar o processo de montagem de um conjunto constituído por cinco componentes metálicos, sujeitos a dois tipos diferentes de ligações: soldadura por pontos e colagem.

No processo de colagem em questão existe uma dispersão da cola da zona alvo para outras zonas críticas, nomeadamente furos. Este processo não está optimizado, pelo que as dificuldades que surgiram requerem um aprofundamento mais detalhado.

Assim, os objectivos específicos desta dissertação são:

- identificar a causa deste problema e qual a etapa do processo afetada;
- analisar e realizar propostas de melhoria ao processo de colagem de duas peças metálicas.

1.2 Metodologia

Tendo por base os objetivos acima enunciados, considerámos pertinente estudar toda a documentação disponível sobre a problemática, que passa pela análise de desenhos – tanto bidimensionais como tridimensionais – de forma a identificar quais as zonas onde existe – ou, neste caso, onde é suposto que exista – contacto entre o componente principal e o reforço interior. Mais ainda, foi necessário especificar quais as condições que resultam do cumprimento estrito do que vem descrito nos desenhos e especificações, ou seja, colocando o reforço interior no componente principal sem os soldar, se são admitidas folgas e qual o seu valor. São assim retirados dados relativos aos valores de material adesivo depositado.

Após realizar uma análise comparativa dos dados recolhidos, foram elaboradas propostas de intervenção que visam minimizar as dificuldades experienciadas.

1.3 Estrutura do documento

No primeiro capítulo apresentamos a introdução da tese. Explicita os objetivos da dissertação, a definição problemática existente, a metodologia adoptada para a sua realização e uma revisão da literatura sobre o tema em questão.

O segundo capítulo apresenta uma caracterização do processo em estudo (processo de colagem associado a uma soldadura por pontos), um estudo aprofundado da problemática, e ainda tece especificações e considerações relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

Ao longo do terceiro capítulo realiza-se uma análise do estado inicial do processo, e faz-se a sua comparação com as especificações descritas.

O quarto capítulo apresenta três propostas de intervenção: uma de redução do volume de adesivo depositado, uma de redefinição de parte do trajecto de um cordão de adesivo e, por fim, uma de reformulação do processo de validação do lote produzido.

No último e quinto capítulo descrevem-se as conclusões, e apresenta-se uma discussão sobre os trabalhos futuros a desenvolver.

O fluxograma da **Error! Reference source not found.** seguinte apresenta sumariamente o enquadramento sequencial de todo o este estudo.

1.4 Breve síntese de processos de produção

O processo de manufacturação, atendendo à etimologia da palavra, significa “feito à mão” (manus – mão; factus – fabrico), embora actualmente os processos de fabrico modernos sejam conseguidos através de maquinaria automatizada e controlada por computador. Tecnicamente a manufatura ou fabricação é a aplicação de processos físicos e químicos que visam a alteração da geometria, propriedades ou aparência de um determinado material inicial para fazer partes ou outros produtos na sua totalidade [1].

Os processos de fabricação podem ser divididos em operações de processamento e de montagem, como é verificável na Figura 1.1. As operações de montagem são aqueles em que duas ou mais partes separadas são ligadas para formar uma nova, de forma semipermanente ou permanente.

Processos de ligação permanente

O interesse em ligar materiais de forma permanente surge na história da humanidade como uma resposta a uma necessidade natural do homem na sua vivência. Quando o homem, na sua relação com o meio, observou certos materiais naturais que caídos em rochas aquecidas pelo sol se tornavam mais macios e aderentes e que mais tarde arrefeciam com o arrefecimento noturno. Desde tempos ancestrais que materiais mais tarde nomeados de colas, gomas, resinas, mucilagem, pastas e, por último, selantes e adesivos são usados[2].

Os processos de ligação permanente são os de soldadura, brasagem, solda e colagem.

A **soldadura** é um processo de junção de dois ou mais componentes em que estes aderem nas suas superfícies de contato por uma aplicação de calor e/ou pressão. Muitos dos tipos de soldadura requerem apenas calor, sem pressão envolvida; outros através de uma combinação de calor e pressão; e ainda alguns apenas através da pressão, sem qualquer calor externo fornecido [2]. É um processo amplamente utilizado em diversos tipos de indústria. Esta utilização tem ocorrido devido aos diferentes tipos de soldadura existentes e à versatilidade de cada um, isto é, permite a sua utilização de forma abrangente e em diferentes tipos de juntas e materiais.

A **brasagem**, por sua vez, permite também a ligação de materiais metálicos, mas neste caso é necessária a adição de material que é fundido acima dos 450°C sem ainda assim existir fusão do material base. Neste método, por não haver fusão do material base, é possível ligar materiais dissimilares de forma expedita e consistente [2].

A **solda** é um processo semelhante à brasagem, com a diferença de que o material de adição é necessariamente fundido abaixo dos 450°C. O facto de operar necessariamente a uma

temperatura mais baixa faz com que este processo seja utilizado num tipo de indústria mais fina e menos pesada, como a eletrônica [2].

Será de seguida explorado o processo ligação permanente **colagem**, alvo desta dissertação.

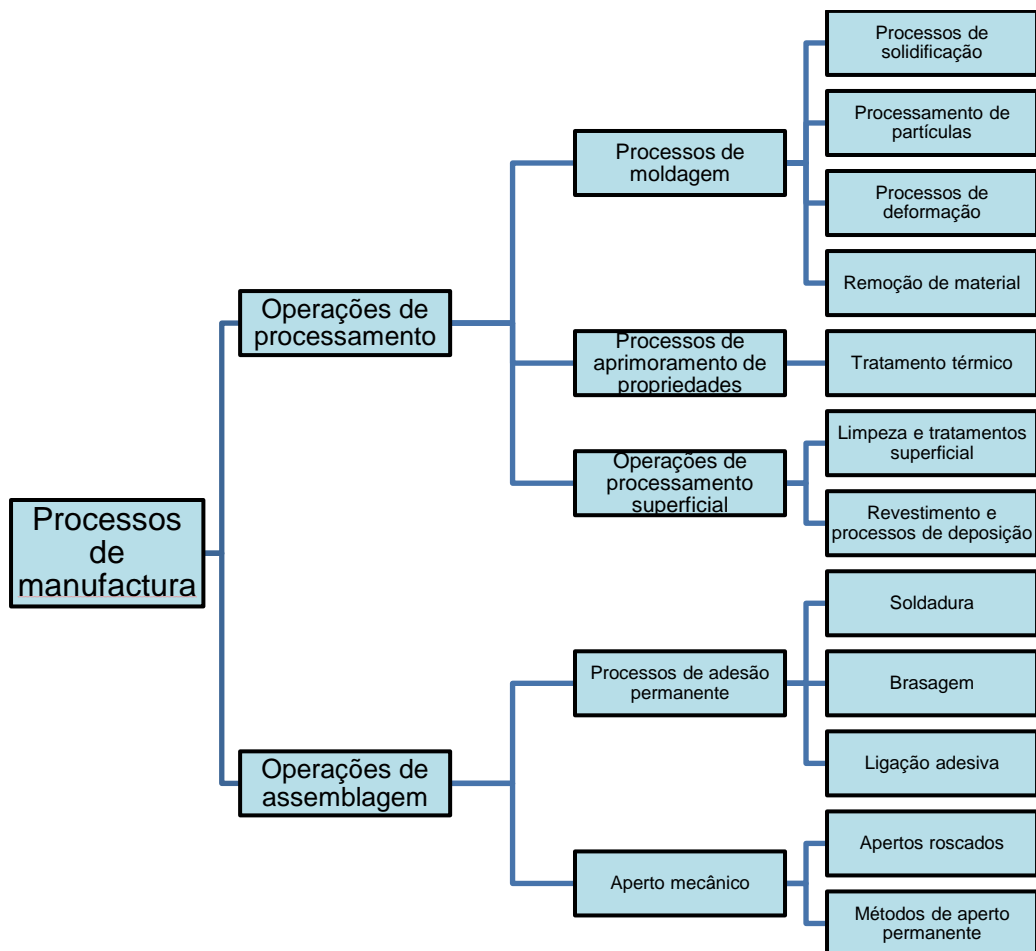


Figura 1.1 - Classificação dos processos de produção (Adaptado de [2])

O processo de colagem

O processo de colagem é aquele através do qual se ligam, superfície com superfície, materiais similares ou dissimilares usando uma substância de um tipo diferente que adere à superfície dos dois materiais a ligar transferindo forças de um para o outro [3].

Dos vários processos de ligação existentes, o de colagem é o mais universal e ancestral, sabendo-se que em 3000 AC os Sumérios já produziam cola de origem animal, e que cerca de 1000 anos mais tarde foi descoberta uma estatua de madeira banhada a ouro, em Ur, que continha um material adesivo feito de asfalto [1,3].

O processo de colagem tem vindo a ganhar importância na indústria como método de ligação de componentes de grandes áreas e com geometrias complexas. A sua utilização – dependendo do tipo de adesivo – pode ter uma função **estrutural** através da ligação de componentes metálicos estruturais; pode adoptar ainda uma função **estabilizadora**, ou seja, reforçando a estabilidade de estruturas já com outro tipo de ligação empregue; ou uma função

anti-flutter, que visa preencher pequenos espaços vazios entre dois componentes melhorando a resistência à fadiga e corrosão [4] (Figura 1.2).

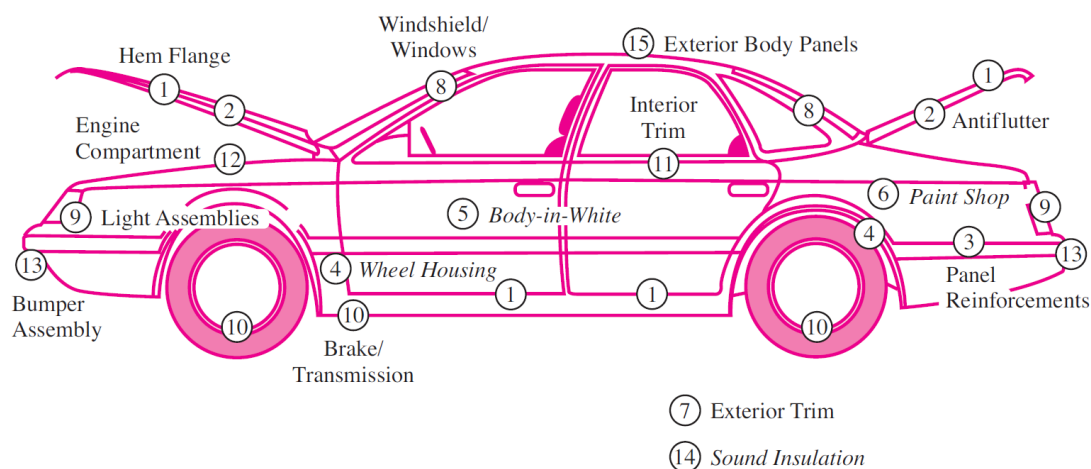


Figura 1.2 - Exemplos de tipos de processos de colagem (1) estrutural, (5) estabilizadora, (2) *anti-flutter* (Adaptado de [4])

Vantagens e desvantagens

O processo de colagem tem a si associado diversas vantagens e desvantagens.

Como vantagens podemos reconhecer o facto de ser um processo isento de apertos mecânicos e, conseqüentemente, de furação, sendo eliminado o peso associado a estes mecanismos. Isto permite a utilização de materiais de menor calibre porque a concentração de tensões associada aos furos é eliminada [4].

Reconhece-se também como vantagem o facto das tensões aplicadas se distribuírem de forma uniforme, e por isso uma elevada resistência dinâmica, não sendo necessário que as superfícies tenham um encaixe perfeito. [3]

Ainda, a complexidade dos conjuntos de estruturas modernas e a diversidade de materiais utilizados fazem com que se possa realizar ligações que não seriam possíveis através de técnicas mais convencionais [4].

Outra vantagem é a de que, quando associada ao processo de soldadura por pontos, a colagem confere uma rigidez estrutural ao conjunto significativamente melhor do que quando o primeiro é utilizado de forma isolada [6].

Como desvantagens deste processo pode referir-se a necessidade de realização de tratamentos de superfície no material onde o adesivo é depositado no sentido de garantir a adesão entre este último e os componentes em questão. Como consequência da necessidade destes tratamentos de superfície, o processo de colagem torna-se naturalmente mais complexo [3].

Por outro lado, as diferenças de temperatura influenciam negativamente a coesão do próprio material adesivo, o que condiciona a resistência da ligação e diminui a resistência ao arrancamento [3, 6, 7].

Para além disso é um processo de ligação permanente cuja separação dos materiais ligados é difícil pois os componentes estão ligados ao longo de toda a sua superfície de contacto com o adesivo [3].

A colagem tem ganho maior destaque na indústria nas últimas décadas pelas vantagens acima descritas, sendo utilizada cada vez mais como processo complementar de ligação de materiais e associado a produções em grande escala. Podemos perceber a sua utilização em diversas indústrias como a de construção, eletrónica, telecomunicações, automóvel, aeroespacial, têxtil, marcenaria, entre outras [6].

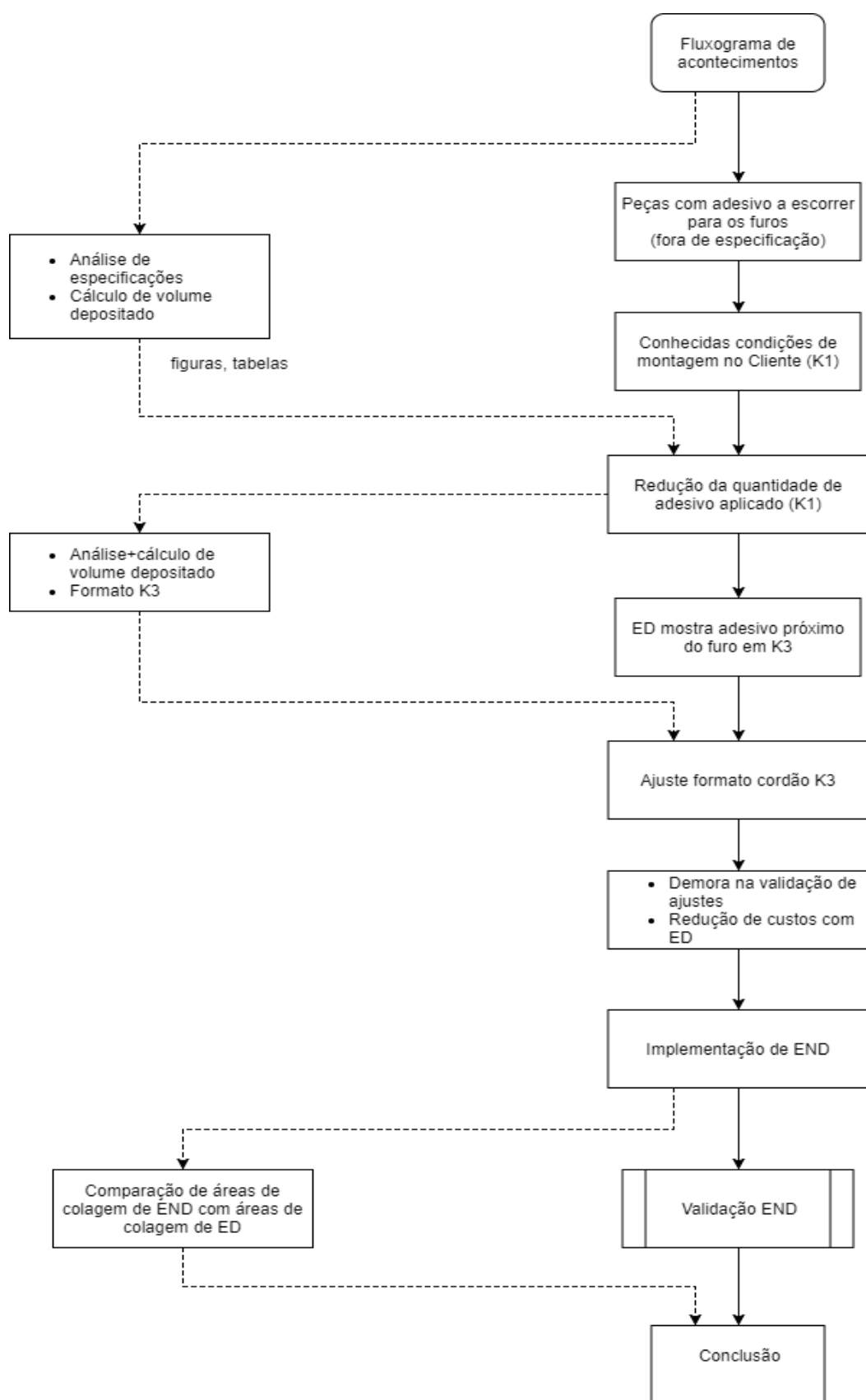


Figura 1.3 - Fluxograma de acontecimentos

2 Caracterização do Processo

2.1 Descrição do processo

De modo sumário, o processo em estudo inicia-se com a colocação, por parte de um operador, do componente principal e do reforço interior na mesa de manipulação de onde são recolhidos por um robô para que uma pistola automática proceda à aplicação de material adesivo – em três locais distintos – no componente principal. Após a aplicação do adesivo o mesmo robô coloca este componente principal numa nova mesa e de imediato insere o reforço no seu interior. No momento seguinte o mesmo operador coloca o reforço exterior do componente principal na mesa e um pequeno componente de interação é também colocado no interior do reforço interior e fixo com um grampo. Ainda na mesma operação o operador coloca uma chapa de fecho na mesa de marcação de modo a gravar o *part number* no conjunto. Na etapa seguinte dois robôs são responsáveis pela soldadura por resistência do reforço interior no componente principal, do reforço exterior no componente principal e do componente de interação no reforço interior (e consequentemente no componente principal também) e a chapa de fecho é marcada. De seguida o operador é responsável por colocar a chapa de fecho já marcada numa outra mesa e de colocar o componente já soldado em cima da chapa de fecho para ser soldado na operação subsequente. Na etapa final do processo o operador retira o conjunto já completamente soldado da mesa de soldadura, coloca-o na estação de retrabalho de modo a proceder à inspecção visual dos pontos de soldadura, ao retrabalho de alguns deles (caso seja necessário) e à inspecção visual, e eventualmente limpeza, dos furos adjacentes às zonas de colagem.

No fim do processo foi detectada – a nível indirecto e após a análise de diversos conjuntos – uma variação nos valores da distância (*gap*) entre o componente principal e o reforço interior. Esta variação de valores, embora possa vir a ser tolerada provoca dificuldades de repetibilidade no processo devido à deposição de material adesivo em algumas das zonas onde existe essa variação.

O processo em estudo tem como objectivo produzir o conjunto representado na Figura 2.1 composta pelos seguintes componentes:

- 1 componente principal;
- 2 reforço interior;
- 3 componente de interação;
- 4 reforço exterior;
- 5 chapa de fecho;
 - a. rosca fêmea;
 - b. chapa de fixação.

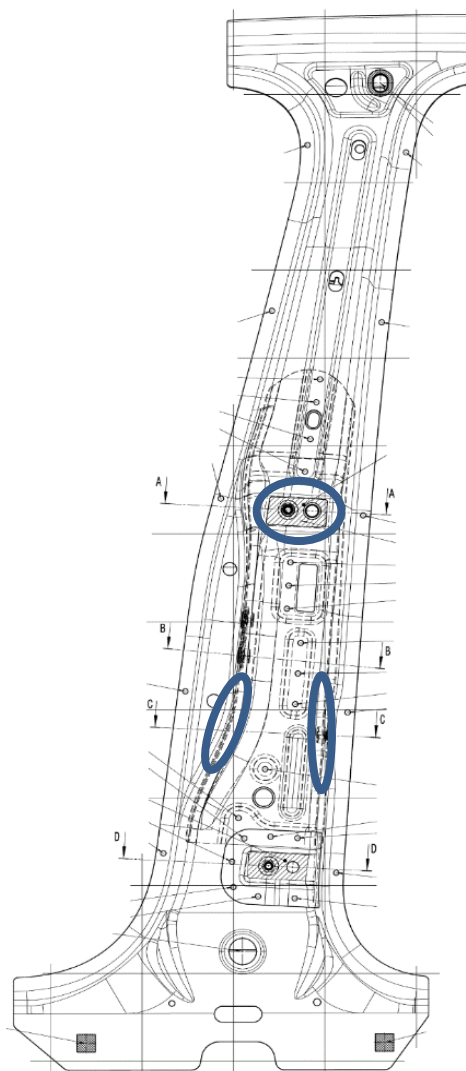


Figura 2.1 - Desenho 2D do exterior do conjunto com as zonas de deposição de material adesivo assinaladas (a deposição é nas zonas assinaladas mas no interior), vista de frente

O componente principal é um componente de aço de ultra-alta resistência produzido pelo processo de estampagem *hot-forming* que consiste na utilização de prensas de estampagem a temperaturas diferentes para o mesmo componente, de modo a que o material ao arrefecer adquira propriedades mecânicas distintas consoante a temperatura à qual a estampagem foi efectuada.

O reforço interior é um componente de aço estampado galvanizado de modo a resistir à corrosão, aderindo da melhor forma ao adesivo e ao componente principal e garantindo durabilidade contra a corrosão.

Os componentes acima descritos são os necessários para as operações que completam o processo, as quais a Tabela 2.1 apresenta de forma sintética.

Tabela 2.1 – Tabela descritiva de todas as operações do processo

OP1	Soldadura da rosca fêmea à chapa de fecho			
OP2	Soldadura da chapa de fixação à chapa de fecho			
OP3	Deposição do adesivo		Colagem do reforço interior e do componente principal	
OP4	Soldadura do reforço interior ao componente principal	Soldadura do componente de interação ao reforço interior	Soldadura do reforço exterior ao componente principal	Marcação da chapa de fecho
OP5	Soldadura da chapa de fecho ao componente principal			
OP6	Estação de retrabalho			

As duas operações iniciais podem ser consideradas independentes das subseqüentes e por essa razão não serão analisadas em detalhe. Por outro lado, as operações 3, 4 e 5 serão as operações críticas do processo e o centro do presente estudo de caso. Isso deve-se não só à quantidade de componentes e complexidade geométrica dos mesmos, mas também às diferentes tipologias de operações envolvidas nas três etapas consideradas.

Começando pela operação de deposição de material adesivo (OP3), esta vem especificada nos desenhos técnicos do componente principal como tendo de abranger determinadas zonas. Como é possível observar assinalado na Figura 2.1 e em pormenor na Figura 2.2 as zonas nas quais é necessário garantir material adesivo têm diferentes geometrias e algumas das suas zonas de fronteira têm requisitos funcionais exigentes (furos e furos roscados) o que se traduz num aumento de complexidade das operações e, por inerência, do processo.

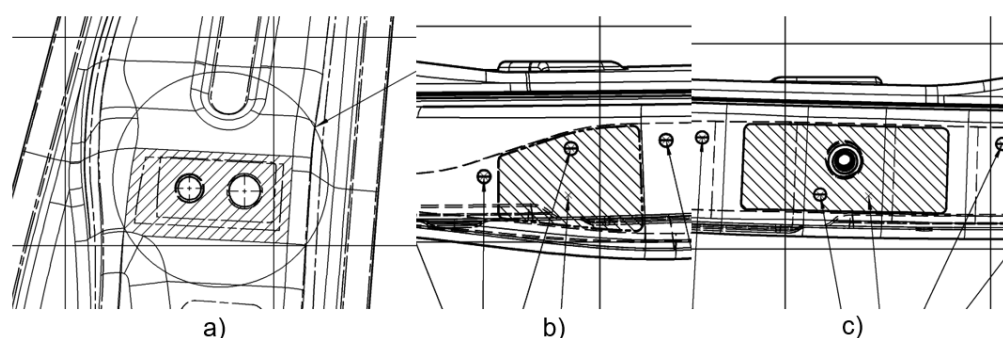


Figura 2.2 - Pormenor 2D (a tracejado) da região a garantir adesivo no componente principal na zona de contacto com: a) base do reforço interior (K1); b) lateral do reforço interior (K2); c) lateral do reforço interior com furo (K3).

Todas as zonas nas quais é requerida a aplicação de material adesivo estão localizadas na interface componente principal-reforço interior: (a) zona onde assenta a base do reforço interior na qual há dois furos, um deles roscado; (b) zona lateral em contacto com o reforço interior; (c) zona lateral onde há contacto com o reforço interior e na qual há também um furo roscado.

A colocação precisa de material adesivo – tanto em termos posicionais como em termos quantitativos – é garantida por robôs industriais, para manipular os componentes, e por uma pistola automática, para a deposição de material adesivo. Tendo em conta os requisitos de área com material adesivo a melhor disposição encontrada pela Empresa, de forma empírica, para os cordões de deposição é a perceptível na Figura 2.3.

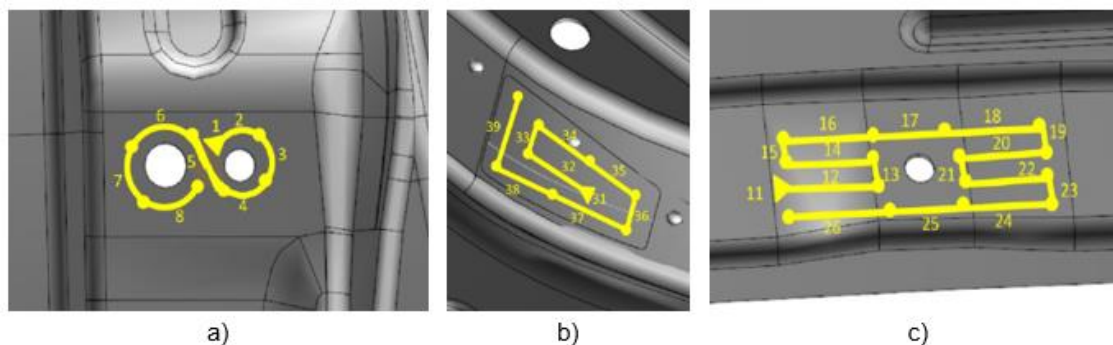


Figura 2.3 - Cordões de deposição de material adesivo com disposição a) em “8” (K1); b) em “espiral” (K2); c) em “H” (K3)

Após a colagem do componente principal com o reforço interior (OP3) a operação que se segue é a operação de soldadura (OP4). O reforço interior é soldado ao componente principal através do processo de soldadura por resistência. No caso da operação em questão a variante de soldadura por resistência utilizada é a soldadura por pontos. A ligação entre o componente principal e o reforço interior é garantida por 42 pontos de soldadura, sendo que 27 destes ligam-nos lateralmente – um destes pontos é responsável pela ligação do componente de interação outros dois componentes – e 15 deles ligam o reforço interior e o componente principal na zona da base (sendo que 4 destes pontos são responsáveis também pela ligação do reforço exterior aos outros dois); outros 6 pontos de soldadura são também responsáveis pela ligação do reforço exterior ao componente principal. Numa fase final a chapa de fecho é ligada ao componente principal através de 10 pontos de soldadura. Somando todos eles o conjunto tem um total de 58 pontos de soldadura. Na Figura 2.4 é possível ver alguns dos pontos de soldadura numa zona de contacto lateral onde na operação anterior há deposição de algum material adesivo.

O processo de soldadura é efectuado por robôs industriais que garantem a repetibilidade e fiabilidade do processo.

Considerando inicialmente a operação de colagem (OP3) – aquela que se pretende estudar em detalhe – é necessário em primeiro lugar detalhar as zonas de encosto entre os componentes envolvidos nesta operação (reforço interior e componente principal). As zonas de encosto entre componentes apresentam-se como zonas de especial importância por ser a partir destas que se torna passível o estudo das variações associadas às tolerâncias (dimensionais e geométricas). Na Figura 2.5 é possível observar em detalhe as zonas de encosto no conjunto e as mesmas zonas especificadas no reforço interior.

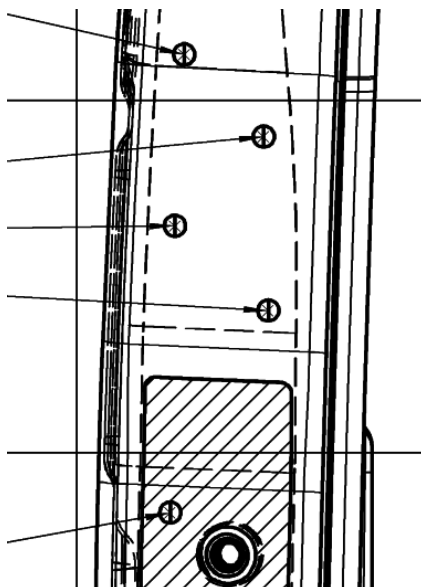


Figura 2.4 - Pontos de soldadura na zona lateral do conjunto que tem o furo roscado na zona com adesivo (K3)

O reforço interior encosta no componente principal nas sete zonas acima assinaladas, todas na base do reforço. Destas zonas, 6 delas são zonas onde os componentes são ligados por soldadura; no caso da zona c) é uma zona em que há encosto com uma das zonas do componente principal onde é existe deposição de material adesivo.

Analisando o caso da deposição de material, e por forma a descrever o processo de forma completa, é necessário especificar as variáveis desta operação em concreto, a saber:

- d – diâmetro do bocal da pistola;
- T – temperatura do material adesivo;
- P – pressão na tubagem do circuito;
- Q – caudal na tubagem do circuito;
- v – velocidade de deslocamento do robô manipulador;

O bocal da pistola automática a usar é aconselhado pelo fabricante tendo em conta o tipo de aplicação pretendida. Neste caso, as quantidades a depositar são pequenas quando comparadas com aplicações mais comuns por isso a opção passa pela escolha de um bocal com diâmetro mais reduzido.

A temperatura é uma variável que influencia de forma inversa a viscosidade do adesivo, ou seja, para um mesmo líquido, com o aumento da temperatura há uma redução da viscosidade. Assim, para garantir estabilidade ao processo, evitando variações de temperatura ambiente induzidas pelas diferentes estações do ano – ou até mesmo durante um dia de trabalho, da manhã para a noite – o sistema de alimentação do material adesivo tem um sistema de aquecimento por forma a compensar estas diferenças de temperatura e a estabilizar o processo.

No caso da pressão e do caudal são duas variáveis necessárias para descrever completamente o escoamento do adesivo ainda dentro da tubagem do circuito.

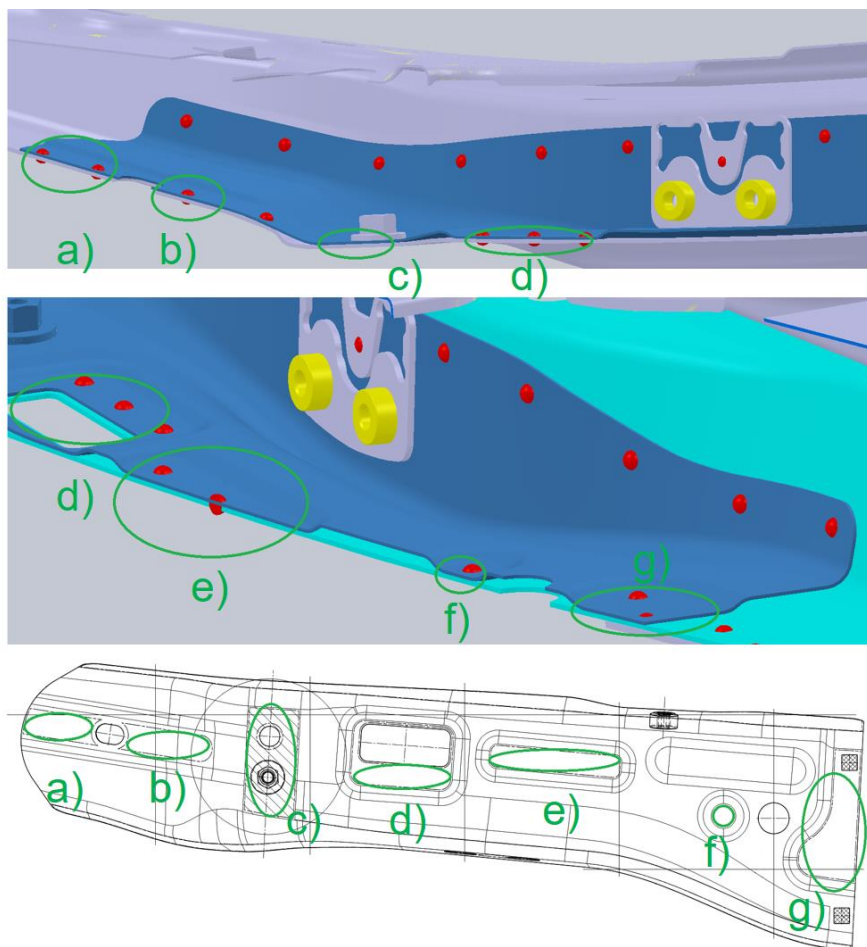


Figura 2.5 - Detalhe das diferentes zonas do conjunto onde existe encosto entre o reforço interior e o componente principal (3D em corte) com a correspondente zona assinalada também no desenho do reforço interior (2D vista de frente); a vermelho os pontos de soldadura

A velocidade de deslocamento do robô manipulador é a variável que define qual o volume de adesivo depositado no componente em cada ponto do trajecto de cada cordão. Logo, há uma relação inversa entre a velocidade de deslocamento do robô manipulador e o volume de adesivo depositado em cada ponto.

Considerando todas as variáveis, podemos afirmar que o diâmetro do bocal e a temperatura são parâmetros de afinação grosseira, que convém ter na gama correcta de valores, mas que não permitem aperfeiçoar o processo em detalhe. Quanto à pressão e ao caudal são variáveis que precisam de uma correlação inversa – um caudal elevado requer uma pressão mais baixa enquanto que um caudal baixo requer uma pressão necessariamente mais alta – deste modo, uma variação pequena em qualquer uma destas variáveis não implicará alterações de maior na deposição de material. Consequentemente, o método mais rigoroso para proceder ajustes finos é o ajuste da velocidade de deslocamento do robô manipulador. A sua gama de velocidades, a precisão e o rigor tornam-no a melhor ferramenta para proceder aos ajustes mais finos, requeridos em etapas mais avançadas do projecto.

A Figura 2.6 seguinte apresenta um fluxograma que esquematiza aproximadamente o processo.

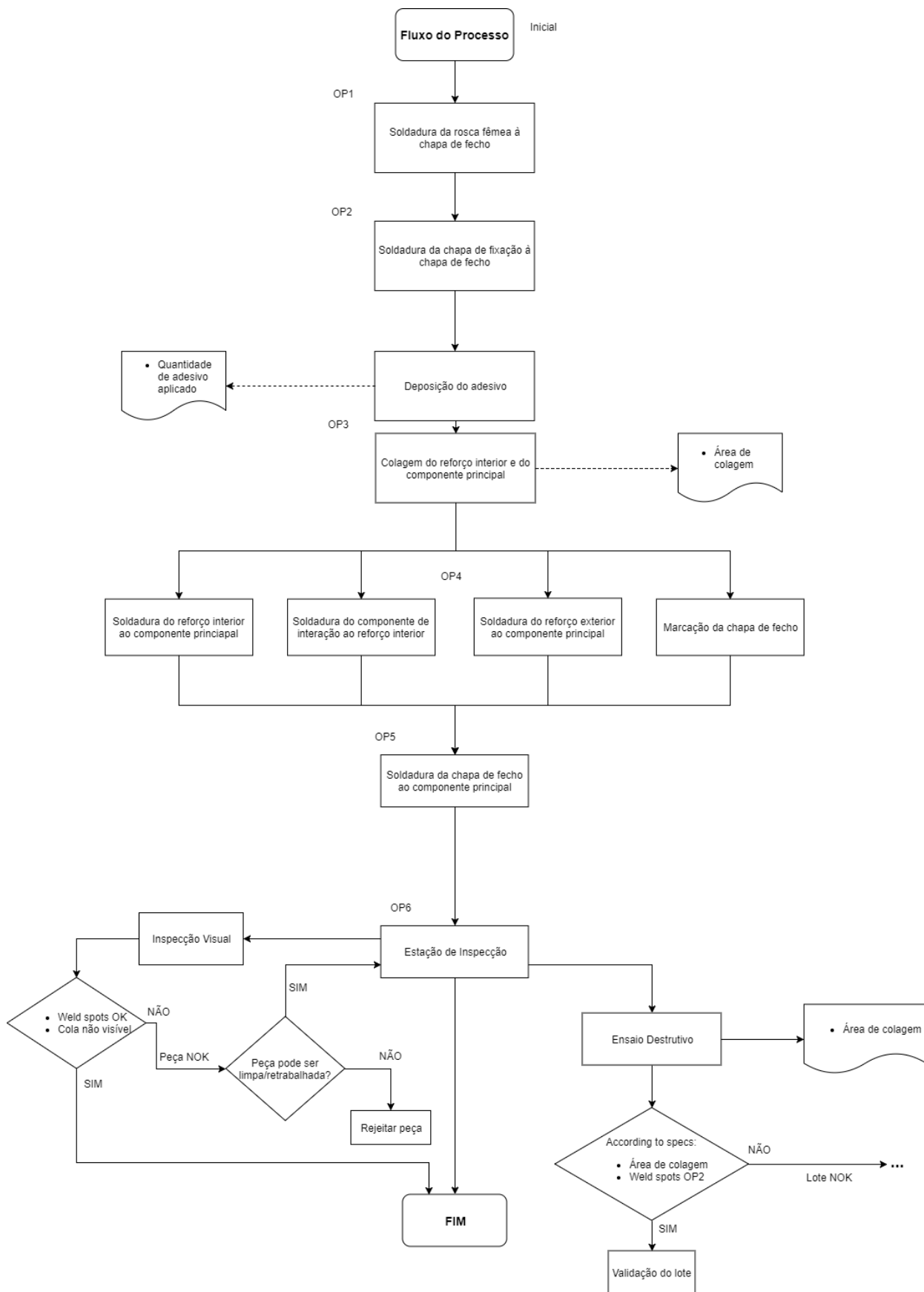


Figura 2.6 - Fluxograma do processo inicial

2.2 Problemática

No contexto acima exposto a OP3 é a operação mais complexa do processo e na qual tem surgido uma questão que se considera relevante esquematizar com mais algum detalhe.

Nas zonas onde é requerida a aplicação de adesivo – especialmente nas zonas de furação roscada – existe uma variabilidade grande do processo de deposição de material.

Sabendo que a cota nominal dos dois componentes implica que, em certas zonas das laterais, estes coincidam perfeitamente. Então, toda e qualquer folga – ou aperto –, de forma especial em zonas de deposição de material adesivo, advirá das tolerâncias dimensionais inerentes a cada um dos componentes.

O componente principal tem uma tolerância dimensional associada a cada uma das faces laterais de $\pm 0,5$ mm, enquanto o reforço interior tem, para cada uma das suas faces laterais, uma tolerância dimensional unidirecional de 0,5 mm no sentido convergente das abas laterais. Considerando os dois casos limites temos: (i) o componente principal na situação de cota máxima – com +0,5 mm que a cota nominal (sentido divergente das faces laterais) – e o reforço interior na situação de cota mínima – com -0,5 mm que a nominal (sentido convergente) – o que resulta numa folga entre componentes de 1 mm para cada um dos lados; (ii) no caso do componente principal estar na situação de cota mínima – com -0,5 mm que a cota nominal (sentido convergente das laterais) – e o reforço interior na condição de cota máxima – na cota nominal – então estamos perante uma situação de aperto. Portanto, por num caso limite (i) a situação ser de folga e noutro (ii) a situação ser de aperto, a montagem destes dois componentes é considerada um ajustamento incerto.

Entretanto o fornecedor requer para a condição mínima de material adesivo que a área com material adesivo não seja inferior a 80% da área requerida, e que, para a condição máxima de material, a menos de 2 mm dos furos roscados não haja presença de material adesivo (ver Figura 2.7).

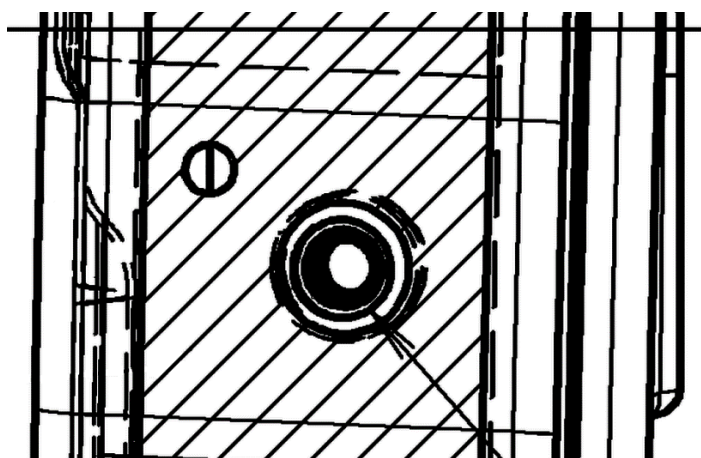


Figura 2.7 - Pormenor da tolerância de deposição de adesivo no furo roscado da zona lateral do conjunto (K3)

A exigência dos requisitos para as zonas de deposição de material adesivo onde existe furação é apertada e de difícil execução. No entanto, o cliente considera que é possível executá-la

sem necessidade de retrabalho de limpeza dos furos roscados e que é o processo é passível de ser afinado por forma a que o conjunto no fim do processo esteja conforme especificação.

Como visto anteriormente as zonas de deposição de adesivo com furos roscados são duas. Na zona de contacto da base do conjunto – onde existe uma furação dupla – verificou-se posteriormente que o cliente executava o aperto daquela zona com o adesivo ainda sem cura. Assim, é possível diminuir o volume de material adesivo depositado, ou seja, ao apertar o material adesivo ainda fresco é possível utilizar menos quantidade de adesivo para ocupar toda área requerida, já que existe uma diminuição do volume de espaçamento entre componentes (*gap*) devida a esse mesmo aperto.

Tendo em conta os requisitos quanto à quantidade de material adesivo a depositar e considerando as variações de volume de *gap* entre componentes que poderão ocorrer, é necessário compreender se estas variações de volume podem justificar a falta de repetibilidade na qualidade de deposição de material adesivo.

2.3 Especificações e considerações relevantes

2.3.1 Tolerâncias geométricas

A análise dos desenhos de componentes e dos desenhos de conjunto possibilitou a identificação de detalhes e especificações relevantes. Como detalhes e especificações relevantes podemos considerar as tolerâncias geométricas e dimensionais – a sua determinação é preponderante para perceber situações limite de montagem – as quantidades de adesivo a depositar e as áreas de colagem a ocupar.

O toleranciamento geométrico é um método de especificar funções duma peça, ou de componentes, e inter-relações entre componentes, ou de peças dum conjunto mecânico. Onde as tolerâncias dimensionais falham em transmitir completamente a informação da funcionalidade dos sistemas mecânicos, nem contemplam, de modo a evitar, determinados erros de fabrico vêm as tolerâncias geométricas colmatar a falta de informação e ambiguidade tanto na especificação do projecto, como durante a produção e a inspecção. Deste modo, o toleranciamento geométrico demonstra ser uma técnica que, adequadamente aplicada, conduz à forma mais económica e eficaz de produção e de inspecção do conjunto [8].

No entanto, por não ser um método de intervenção directa no conjunto ou na linha de produção, mas sim uma metodologia de desenho associada ao projecto, é muitas vezes desconsiderada pela indústria e consequentemente, por vezes, tem pouca expressão na academia. Ainda assim, é uma metodologia em desenvolvimento e com um peso cada vez maior na indústria [9] e na academia.

A primeira especificação a ter em consideração é a tolerância dimensional geral do desenho, que é de $\pm 0,8$ mm. Para além da tolerância geral do desenho existem zonas para as quais são especificadas tolerâncias distintas. Nomeadamente ao longo de toda a superfície de ambas as abas laterais, na superfície de colagem da zona K1 e em todas as regiões onde existem

pontos de soldadura (tanto do componente principal como do reforço interior) a tolerância dimensional admitida é de $\pm 0,5$ mm.

No caso concreto dos componentes em estudo, após a análise dos desenhos dos componentes – em especial dos componentes trabalhados nas OP 3 e 4 – bem como dos desenhos de conjunto, estes têm tolerâncias geométricas específicas para algumas zonas consideradas mais críticas:

- i) componente principal, na zona exterior da base que é duplamente furada e que no interior tem material adesivo depositado com o formato de “8”;
- ii) componente principal, na zona lateral onde há uma dupla furação quadrangular – existente também no reforço interior – e onde é fixado o componente de interação;
- iii) reforço interior, na zona exterior que entra em contacto com a zona onde é depositado o material adesivo em formato de “8” no componente principal;
- iv) reforço interior, na zona onde existe uma dupla furação quadrangular e onde é soldado o componente de interação;
- v) no conjunto, na zona interior, numa das laterais onde há deposição de material e onde há um furo roscado;
- vi) no conjunto, na zona interior onde existe uma dupla furação em que um dos furos é roscado.

Para o caso (i), exposto na Figura 2.8, a região delimitada e representada a traço inclinado é na zona exterior do componente principal. É uma zona da base do componente, onde existem dois furos e onde, no mesmo local mas no interior, é depositado material adesivo à volta dos dois furos com a forma de “8”. A superfície considerada tem uma tolerância geométrica de planeza de 0,2 mm, i.e., a superfície considerada terá de estar contida entre dois planos paralelos espaçados de 0,2 mm. Para além disto a superfície à qual a tolerância diz respeito é considerada superfície de referência A, o que indica a sua preponderância.

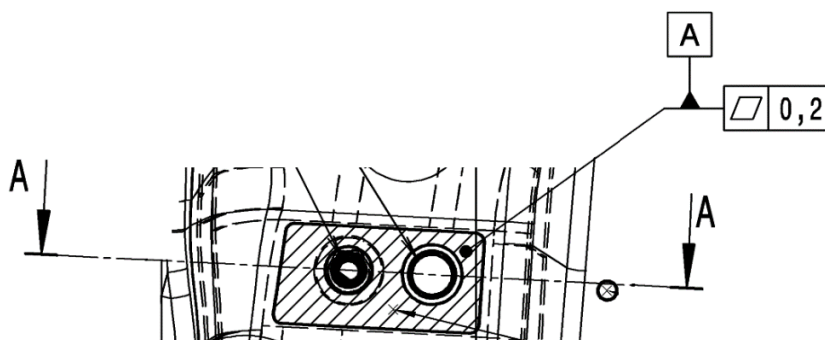


Figura 2.8 - Pormenor da zona exterior da base do componente principal (K1)

Considerando o caso (ii), apresentado na Figura 2.9, os dois furos quadrangulares são zonas de interação com o reforço interior e com o componente de interação e por isso requerem toleranciamento geométrico. A tolerância geométrica de simetria de 0,4 mm do eixo vertical do furo quadrangular superior em função do eixo vertical do furo quadrangular inferior; i.e., o eixo vertical do furo quadrangular superior tem de estar contido entre dois planos, separados de 0,4 mm,

dispostos simetricamente em relação ao eixo de referência (eixo vertical do furo quadrangular inferior) e perpendiculares ao plano dos furos.

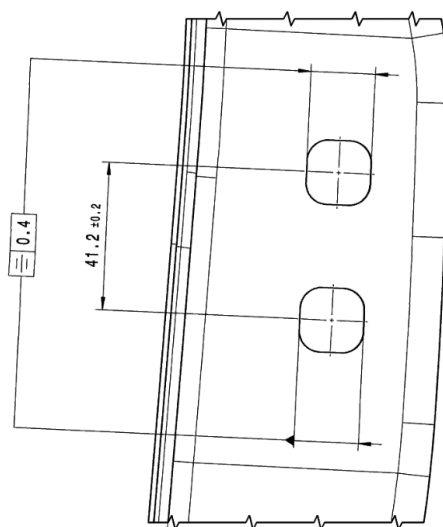


Figura 2.9 - Pormenor da zona lateral do componente principal com dupla furação aproximadamente quadrangular

No caso (iii), retratado na Figura 2.10, é relativo à zona da base exterior do reforço interior duplamente furada onde há contacto com o material adesivo depositado em formato de “8” no componente principal. Assim, há na verdade duas tolerâncias geométricas. A primeira é relativa à forma e é uma tolerância de planeza de 0,2 mm da superfície marcada a traço inclinado, portanto, a superfície deverá estar contida entre dois planos paralelos separados de 0,4 mm. Em segundo lugar temos uma tolerância de simetria de 1 mm do eixo horizontal do furo roscado em relação ao eixo horizontal furo simples adjacente, quer isto dizer que, o eixo horizontal do furo roscado deve estar contido entre dois planos, separados de 1 mm, dispostos simetricamente em relação ao eixo de referência (eixo horizontal do furo simples) e perpendiculares ao plano dos furos.

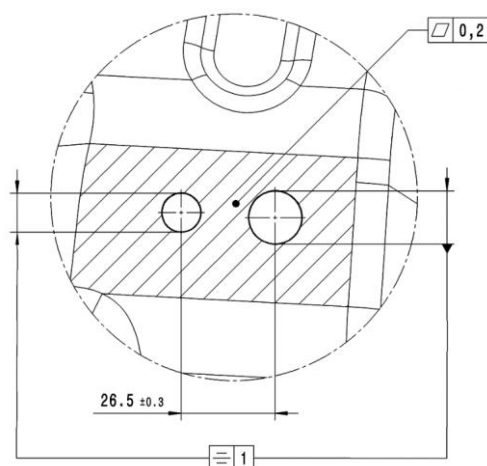


Figura 2.10 - Pormenor da zona exterior da base do reforço interior com furação dupla

Abordando agora o caso (iv), visível na Figura 2.11, é possível observar em pormenor a zona do reforço interior onde há a dupla furação – idêntica à do componente principal – e que entra em contacto directo com o material adesivo depositado em forma de “8” na base do componente principal. Neste caso a tolerância geométrica é – em tudo semelhante ao caso (ii) – de simetria de 0,4 mm do eixo vertical do furo quadrangular superior em função do eixo vertical do furo quadrangular inferior; i.e., o eixo vertical do furo quadrangular superior tem de estar contido entre dois planos, separados de 0,4 mm, dispostos simetricamente em relação ao eixo de referência (eixo vertical do furo quadrangular inferior) e perpendiculares ao plano dos furos.

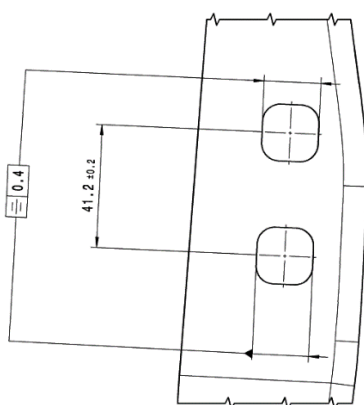


Figura 2.11 - Pormenor da zona lateral do reforço interior com dupla furação quadrangular

O caso (v) representa (Figura 2.12) o conjunto já montado e particulariza a zona interior lateral na qual o reforço interior é ligado ao componente principal por adesivo e onde também existe um furo roscado. Neste local é especificada uma tolerância geométrica de coaxialidade de 1 mm, ou seja, o eixo do furo roscado deve estar contido numa zona cilíndrica de diâmetro 1 mm coaxial com o eixo do furo simples do componente principal; assim como o inverso, i.e., o furo simples deve estar contido numa zona cilíndrica de diâmetro 1 mm coaxial com o eixo do furo roscado do reforço interior. Cada um dos eixos dos furos é referência do outro.

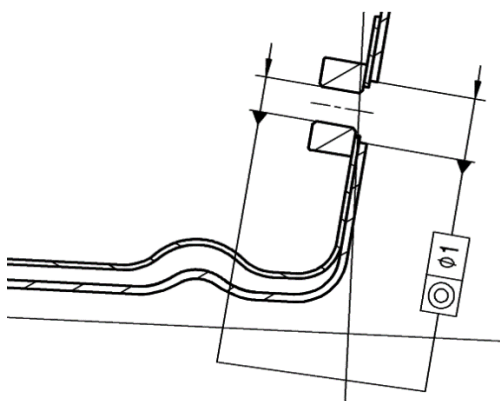


Figura 2.12 - Pormenor da zona com furação roscada na lateral do conjunto, vista de topo e em corte

Por último, o caso (vi), representado na Figura 2.13, demonstra o conjunto – conjunto de componentes já montado – e em corte, a zona de dupla furação simples em que um dos furos é roscado. Nesta zona a tolerância geométrica é de coaxialidade de diâmetro 1 mm, ou seja, o eixo do furo roscado deve estar contido numa zona cilíndrica de diâmetro 1 mm coaxial com o eixo do furo simples; assim como o inverso, i.e., o furo simples deve estar contido numa zona cilíndrica de diâmetro 1 mm coaxial com o eixo do furo roscado. Portanto, como é notório através da Figura 2.13, cada um dos eixos é referência um do outro. Mais ainda, é possível observar uma segunda condição de toleranciamento, uma tolerância de planeza de 0,2 mm da superfície exterior do componente principal – idêntica à enunciada no caso (iii) pois é a zona de encosto entre o componente principal e o reforço interior –, portanto, a superfície exterior deverá estar contida entre dois planos paralelos separados de 0,4 mm.

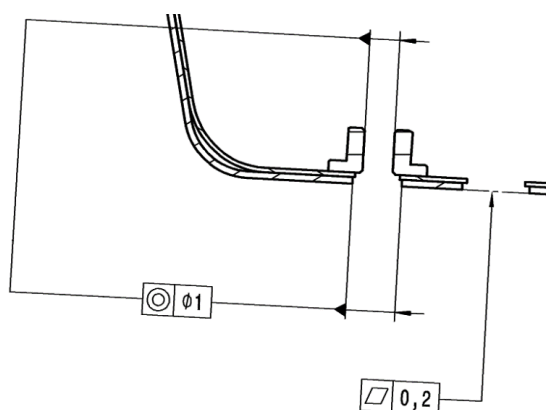


Figura 2.13 - Pormenor da zona de dupla furação na base do conjunto, vista de topo e em corte

Os casos descritos anteriormente representam as tolerâncias geométricas requeridas para os componentes em trabalho nas OP 3 e 4, onde os processos de ligação e os componentes envolvidos são críticos para o presente estudo.

Tendo em conta os casos supramencionados e a preponderância das tolerâncias geométricas de modo a garantir montagem, importa tecer algumas considerações sobre certas zonas do conjunto e dos seus componentes:

1. Aba lateral do reforço interior e do componente principal

Considerando o caso (v) retratado no ponto anterior, o reforço interior tem um furo roscado na lateral que na realidade não é mais do que uma rosca fêmea soldada (no fornecedor) no seu interior; e relembrando que a tolerância geométrica especificada é de coaxialidade de 1 mm do furo roscado do reforço interior em relação ao furo simples do componente principal, e o inverso; torna-se do maior interesse ter em atenção a tolerância de localização permitida na ligação da rosca ao reforço.

No que ao desenho do reforço interior diz respeito é possível observar na Figura 2.14 que nada é especificado quanto à tolerância de coaxialidade da rosca em relação ao furo simples do reforço.

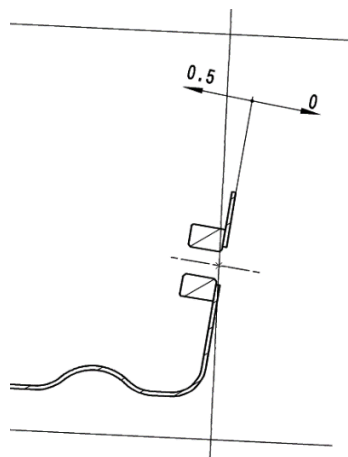


Figura 2.14 - Pormenor da zona lateral do reforço interior com a rosca fêmea, vista de topo e em corte

Na prática, sabendo que o raio médio da rosca fêmea ISO M8 é de 3,4 mm e que o raio do furo no componente principal é de 6 mm, através da diferença de valores, obtém-se um valor para a folga de 2,6 mm, que nunca é ultrapassado pois a tolerância geométrica de coaxialidade entre os dois eixos é de 1 mm ($< 2,6$ mm). Assim, a grande questão estará entre a rosca fêmea e o reforço interior, já que não há tolerância geométrica de posição especificada entre os dois componentes.

Atentando a esse facto, e sabendo que o raio do furo do reforço interior é de 4,75 mm, então a folga – a diferença entre os raios do reforço interior e da rosca – é de 1,6 mm. Por esta razão, para valores de distância entre o eixo da rosca e o eixo do furo do reforço interior superiores à folga ($> 1,6$ mm), não é possível garantir montagem do componente que virá a ser fixado através daquela rosca, mesmo garantindo a tolerância geométrica de 1 mm especificada entre o eixo da rosca e o eixo do componente principal (ver Figura 2.15).

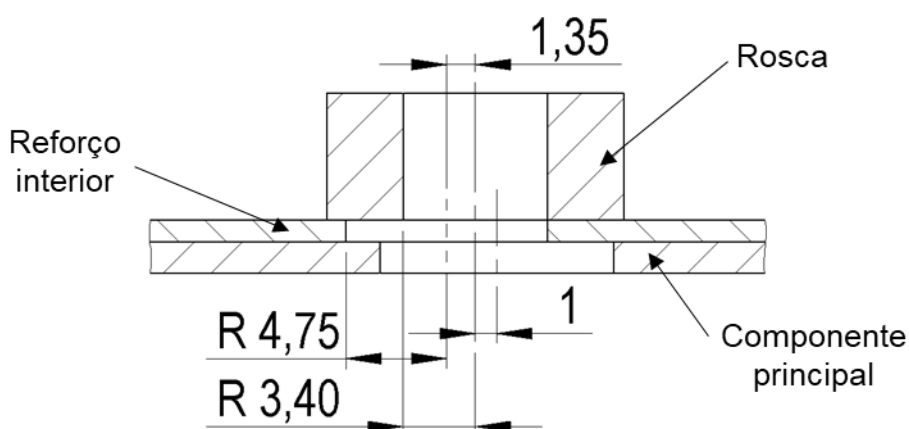


Figura 2.15 - Pormenor da zona lateral do conjunto na condição limite de tolerância geométrica de coaxialidade de 1 mm entre o eixo da rosca e o eixo do furo do componente principal e na situação limite de montagem, vista de topo e em corte

2. Base do reforço interior e do componente principal

Contemplando agora o caso (vi), na base do reforço interior existe uma dupla furação com uma rosca hexagonal soldada (no fornecedor) ao furo de menor diâmetro, cujo eixo tem de cumprir uma tolerância geométrica de coaxialidade de 1 mm com eixo do furo simples do componente principal, assim como o inverso, ou seja, o eixo do furo do componente principal tem uma tolerância de 1 mm com eixo do furo da rosca do reforço interior.

O interesse desta questão prende-se com o facto de nos desenhos do reforço interior, uma vez mais, nada ser especificado quanto à tolerância geométrica entre o furo da rosca fêmea e o furo simples, tal como está exposto na Figura 2.16.

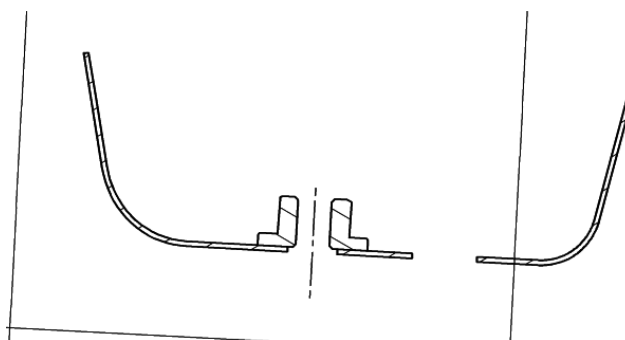


Figura 2.16 - Pormenor da zona base do reforço interior com furação dupla e rosca hexagonal soldada, vista de topo e em corte

Conhecendo mais uma vez o raio da rosca ISO M8 que é igual a 3,4 mm e o raio do furo do componente principal que é de 5,5 mm, a folga – ou seja, a diferença entre eles – é de 1,9 mm. No entanto, a tolerância geométrica de coaxialidade de 1 mm entre os eixos dos dois furos garante a montagem entre a rosca hexagonal e o furo do componente principal. Na verdade, o problema estará entre estes dois furos, i.e., na relação entre o eixo da rosca e o eixo do furo do reforço interior, pois nada é especificado nos desenhos.

Neste caso, sabendo que o raio do furo do reforço interior é de 5 mm a folga – diferença entre raios – é de 1,6 mm. Então, para valores de desvio entre o eixo da rosca hexagonal e o eixo do furo superiores a 1,6 mm, mesmo em caso de cumprimento da tolerância geométrica de coaxialidade entre o eixo da rosca e o eixo do furo do componente principal, não é possível garantir a montagem do componente que vier a ser fixo naquela rosca (ver Figura 2.17).

Pelas razões acima explicitadas, no que às tolerâncias geométricas associadas do conjunto diz respeito, concluímos que existe a possibilidade de que sejam produzidos, validados e entregues ao cliente, conjuntos dentro de especificação e que, no entanto, não sejam passíveis de montagem adiante no processo, i.e., no cliente.

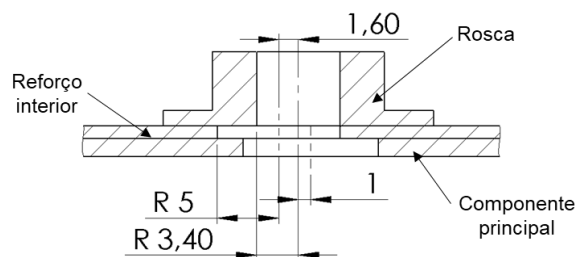


Figura 2.17 - Pormenor da zona base do conjunto na condição limite de tolerância geométrica de coaxialidade de 1 mm entre o eixo da rosca hexagonal e o eixo do furo do componente principal e na situação limite de montagem, vista de topo e em corte

2.3.2 Volume de adesivo e área de colagem

O volume de adesivo a depositar e a área de colagem a preencher são duas especificações imprescindíveis para que exista repetibilidade e consistência na produção dos vários lotes. Tais especificações estão representadas no desenho de conjunto e apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Volume de adesivo e área de colagem especificados no desenho de conjunto para cada zona de colagem

	K1	K2	K3
Volume [mm³]	310	560	790
Área [mm²]	1550	2800	3950

Conhecendo os valores de volume de deposição e de área de colagem pressupostos e tendo por base a seguinte expressão (com s a representar a espessura de adesivo entre componentes),

$$V = A s \quad (2.1)$$

é então possível obter a espessura de adesivo para cada uma das zonas de colagem:

$$s_{K1s} = \frac{V_{K1}}{A_{K1}} = \frac{310}{1550} = 0,2 \text{ mm}$$

$$s_{K2s} = \frac{560}{2800} = 0,2 \text{ mm}$$

$$s_{K3s} = \frac{790}{3950} = 0,2 \text{ mm}$$

Assim, pela análise das especificações, a espessura de adesivo é de 0,2 mm e é igual para todas as regiões de colagem (K1, K2 e K3).

Mais ainda, está especificado que para cada furo passante localizado numa zona de colagem exista uma região de 2 mm de distância dos limites do furo sem material adesivo. Esta especificação consta, de forma particular, no desenho de conjunto e consequentemente assume prioridade por comparação com as especificações normativas (neste caso concreto a especificação normativa era de maior valor de *clearance*).

3 Estado inicial e comparação com especificações

3.1 Estado inicial

Nos capítulos anteriores abordámos a problemática, foi feita uma descrição detalhada do processo e também das especificações requeridas, consequentemente, importa neste momento alargar um pouco o espectro de análise e abordar a envolvente, ou seja, proceder a uma análise concreta do que está a ser feito e relacioná-lo com as especificações exigidas.

De forma complementar procedamos à análise dos cordões e da sua disposição recordando que a disposição dos cordões de deposição foi decidida empiricamente pela Empresa e que a sua alteração geométrica na fase na qual o processo presentemente se encontra torna-se impraticável.

Inicialmente foram medidos – com recurso a um paquímetro digital de resolução 0,01 mm – os cordões de deposição de um componente principal retirado a meio do curso de trabalho (OP3, antes da colocação do reforço interior) e submetido a um processo de cozedura de 30 minutos a 180°C, o que permite a análise e medição dos cordões de material adesivo seco na forma exacta como são depostos.

Partindo das imagens de cada umas das zonas e através da medição directa dos cordões de deposição foi possível extrapolar o volume depositado e, sabendo que a altura do cordão (ou espessura, por se encontrar entre dois componentes) requerida é de $s_{K1s} = 0,2$ mm, conseguir um valor aproximado para a área coberta por adesivo – ou seja, conhecendo o comprimento, largura e altura de cada um dos cordões é trivial calcular o volume depositado. A partir do volume inicial, através da relação entre as espessuras especificada (pós-montagem) e inicial (pré-montagem) e mais ainda considerando que não há alteração do comprimento inicial devido à conservação da massa do sistema, então é consequente chegar ao novo valor de largura.

3.1.1 Análise indirecta ao cordão K1

No caso do cordão de adesivo que rodeia a dupla furação (K1) através da medição com um paquímetro da altura, largura e comprimento do cordão de deposição de adesivo é possível obter uma aproximação do volume depositado.

Assim, o estado do cordão K1 no início da análise é detalhado na Figura 3.1.

O formato do cordão K1 pode ser aproximado por duas circunferências tangentes (ver Figura 3.2, alínea a)), uma com $\phi_{K1.1} = 34$ mm e outra com $\phi_{K1.2} = 37$ mm e o volume de adesivo depositado produz um cordão com uma altura e largura aproximadamente uniformes de $s_{i_{K1}} = 1,2$ mm e $t_{i_{K1}} = 2,4$ mm respectivamente. Calculamos o factor de relação r entre alturas através da expressão (3.1).

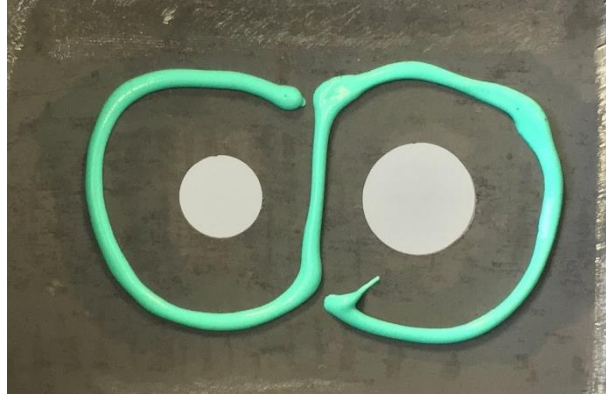


Figura 3.1 - Imagem do cordão K1 cozido

$$r = \frac{s_s}{s_i} \quad (3.1)$$

e obtemos então o valor de,

$$r_{K1} = \frac{s_{sK1}}{s_{K1i}} = \frac{0,2}{1,2} = \frac{1}{6} \quad (3.2)$$

para o factor de relação de alturas no caso do cordão K1.

Ora, respeitando a lei da conservação da massa e assumindo que não existe uma alteração no comprimento dos cordões:

$$r_{K1} = \frac{s_{K1s}}{s_{K1i}} = \frac{t_{K1i}}{t_{K1s}} \quad (3.3)$$

tem-se que

$$t_{K1s} = t_{K1i} \cdot \frac{1}{r_{K1}} = 2,4 \times 6 = 14,4 \text{ mm} \quad (3.4)$$

É então perceptível que para um cordão com uma largura inicial (pré-montagem) aproximada de $t_{K1i} = 2,4 \text{ mm}$ a largura pós-montagem – em teoria e segundo especificação – é seis vezes a largura pós-montagem, ou seja, $t_{K1s} = 14,4 \text{ mm}$.

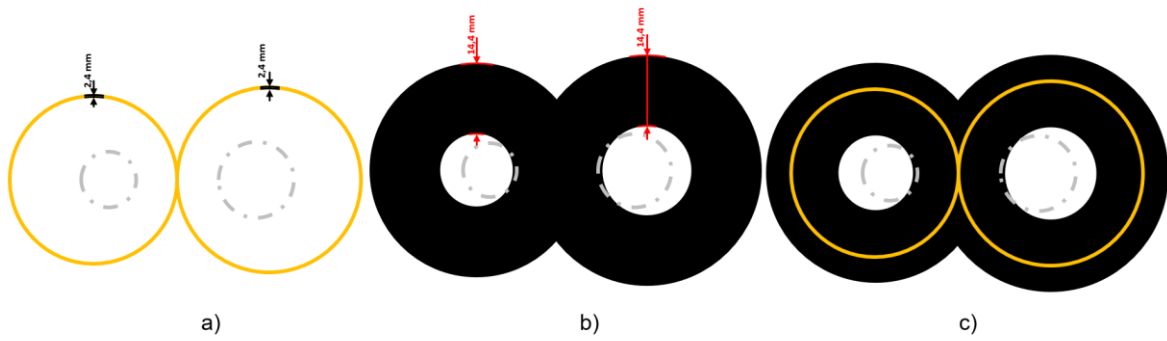


Figura 3.2 – Esquema aproximado do formato do cordão K1: a) pré-montagem; b) pós-montagem; c) comparação entre os casos anteriores

A distância entre os eixos dos furos especificada é de $l_{K1} = 26,5$ mm, o diâmetro dos furos é de $\phi_{K1.1} = 11$ mm e $\phi_{K1.2} = 15$ mm então a distância entre as tangentes mais próxima de cada um dos furos será igual a

$$d_{K1} = l_{K1} - \left(\frac{\phi_{K1.1} + \phi_{K1.2}}{2} \right) \Rightarrow d = 26,5 - \frac{15+11}{2} = 13,5 \text{ mm} \quad (3.5)$$

De acordo com a equação (3.4) a largura do cordão na zona entre furos – após aperto – será de $t_{K1_s} = 14,4$ mm enquanto que a equação (3.5) conclui que a distância entre furos é de $d = 13,5$ mm. Então, a distância entre furos é menor do que a suposta largura do cordão nessa mesma zona, i.e., em teoria – com o volume de adesivo depositado à data – existirá adesivo a escorrer pelos furos, como demonstra a Figura 3.2 (b).

Através das medições efectuadas é ainda possível estimar o volume de adesivo depositado recorrendo à equação

$$V_{K1_{apx}} = \pi (\phi_{K1.1} + \phi_{K1.2}) t_{K1_i} s_{K1_i} \quad (3.6)$$

Então:

$$V_{K1_{apx}} = \pi (34 + 37) \times 2,4 \times 1,2 = 642 \text{ mm}^3 = 0,642 \text{ cm}^3 \quad (3.7)$$

3.1.2 Análise indirecta ao cordão K2

No caso do cordão de adesivo existente na única zona de colagem não-furada (K2) através do mesmo método realizado anteriormente é possível aproximar o volume depositado.

A Figura 3.3 representa o estado do cordão K2 aquando da medição.



Figura 3.3 - Imagem do cordão K3 cozido

Na zona K2 o formato do cordão pode ser aproximado por uma “espiral” (com formato exterior similar a um trapézio) que terá altura e largura consistentes ao longo de todo o comprimento do cordão com valores de respectivamente $s_{i_{K2}} = 1,8 \text{ mm}$ e $t_{i_{K2}} = 4,5 \text{ mm}$ (são visualmente notórias as pequenas variações de largura e altura do cordão mas o valor exacto é de difícil determinação por inadequação do aparelho de medida e dificuldades de acesso; ainda assim, tendo em consideração o objectivo serve a aproximação realizada).

Recapitulando o raciocínio realizado previamente (equação (3.4)), para o caso do cordão K2 o factor de relação de alturas será

$$r_{K2} = \frac{s_{K2s}}{s_{K2i}} = \frac{0,2}{1,8} = \frac{1}{9} \quad (3.8)$$

De modo consequente, segundo a expressão de conservação da massa

$$r_{K2} = \frac{s_{K2s}}{s_{K2i}} = \frac{t_{K2i}}{t_{K2s}} \quad (3.9)$$

e a simplificação de considerar que não existe alteração no comprimento do cordão (total e, por isso, em cada uma das suas parcelas) obtemos então

$$t_{K2s} = t_{K2i} \frac{1}{r_{K2}} = 4,5 \times 9 = 40,5 \text{ mm} \quad (3.10)$$

valor este que poderá ser considerado elevado.

Se tentarmos obter uma aproximação do volume depositado através da seguinte equação:

$$V_{K2apx} = l_{K2apx} s_{K2i} t_{K2i} \quad (3.11)$$

$$V_{K2apx} = 190 \times 1,8 \times 4,5 = 1539 \text{ mm}^3 = 1,539 \text{ cm}^3 \quad (3.12)$$

3.1.3 Análise indirecta ao cordão K3

Alternando para o caso do cordão K3, é um cordão de formato mais complexo (como que o *outline* de um “H”) que, para efeitos de aproximação poderemos considerar, tem de altura $s_{K3_i} = 1,8 \text{ mm}$ e de largura $t_{K3_i} = 3,0 \text{ mm}$ constantes ao longo de todo o comprimento.

A Figura 3.4 abaixo representa o cordão K3 na altura inicial do estudo.

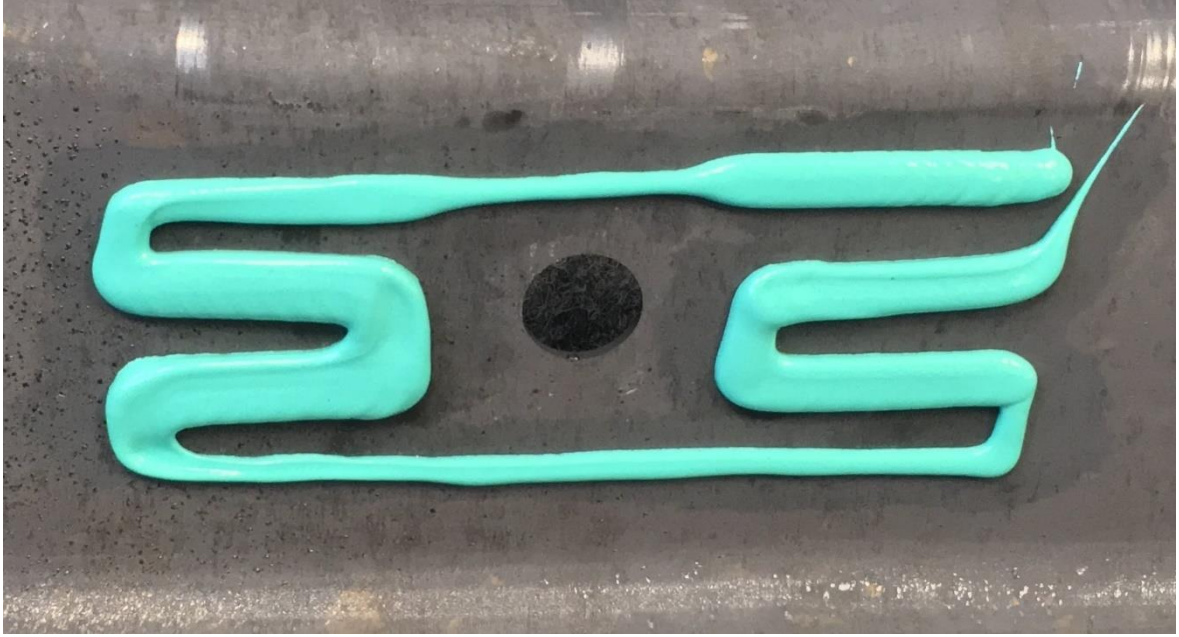


Figura 3.4 - Imagem do cordão K3 cozido

Então, retomando a equação (3.4), o factor de relação de alturas é obtido por

$$r_{K3} = \frac{s_{K3_s}}{s_{K3_i}} = \frac{0,2}{1,8} = \frac{1}{9} \quad (3.13)$$

e a equação da conservação

$$r_{K3} = \frac{s_{K3_s}}{s_{K3_i}} = \frac{t_{K3_i}}{t_{K3_s}} \quad (3.14)$$

associadas à simplificação já mencionada de manutenção do comprimento do cordão resultam em

$$t_{K3_s} = t_{K3_i} \frac{1}{r_{K3}} = 3 \times 9 = 27 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Importa, no entanto, ressaltar que neste caso específico a distribuição do material adesivo não será uniforme pois a aproximação realizada, ao considerar os valores de altura e largura constantes ao longo do cordão, apesar de ser válida globalmente, localmente já não é

válida o que resultará em diferentes modos de dispersão do adesivo tal como a Figura 3.5 seguinte recria.

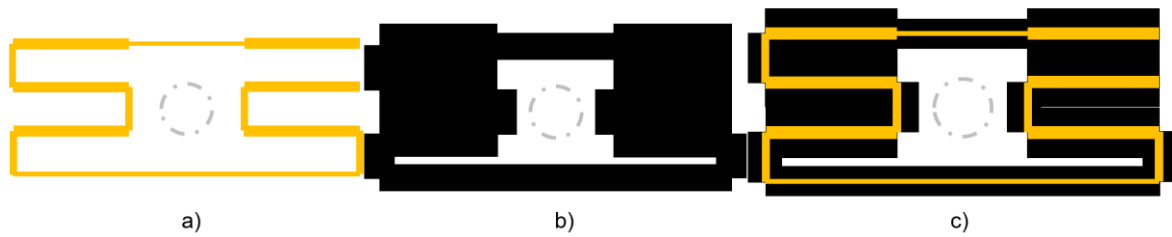


Figura 3.5 - Esquema aproximado do formato do cordão K3: a) pré-montagem; b) pós-montagem; c) comparação entre os casos anteriores

Ora tendo em consideração que para esta simples esquematização recorreremos a valores aproximados, a incerteza associada e a proximidade do cordão pós-montagem ao furo – verticalmente, na zona interior adjacente ao furo – podem ser indicativos iniciais de uma propensão para que parte do adesivo escorra para o furo.

No que concerne o volume aproximado de material depositado a equação seguinte:

$$V_{K3_{apx}} = l_{K3} s_{K3_i} t_{K3_i} \quad (3.16)$$

Como exposto na Figura 2.3 (alínea c)) e Figura 3.5 o cordão K3 tem um formato complexo que através de medição se concluiu ter um comprimento aproximado de $l_{K3} = 390$ mm, o que associado aos valores de s_{K3_i} e t_{K3_i} (altura e largura, respectivamente) detalhados acima e à equação anterior (3.16) se traduz num volume estimado de:

$$V_{K3_{apx}} = 390 \times 3 \times 1,8 = 2106 \text{ mm}^3 = 2,106 \text{ cm}^3 \quad (3.17)$$

A Tabela 3.1 apresentada de seguida agrupa os valores de volume especificados por cordão apresentados na Tabela 2.2 e os valores aproximados calculados para cada um nas equações (3.7), (3.12) e (3.17), bem com um factor de relação entre eles.

Tabela 3.1 - Comparação entre volume especificado pelo desenho de conjunto e volume calculado por aproximação

Cordão	Volume especificado 2D [mm ³]	Volume aproximado [mm ³]	Factor $\frac{apx}{spec}$
K1	310	642	2,1
K2	560	1539	2,8
K3	790	2106	2,7

3.2 Análise dimensional dos componentes

A análise realizada anteriormente, de caracterização de todo processo, das variáveis que o influenciam, das tolerâncias – geométricas e dimensionais – envolvidas e o levantamento inicial do estado do processo pretendem basear e substanciar o aprofundamento e desenvolvimento da problemática.

O desenvolvimento do estudo de caso compreende uma análise detalhada das zonas de contacto entre os componentes onde existe material adesivo. A saber de antemão sobre as zonas a estudar: (i) a zona de deposição de adesivo K1 – com o formato em “8” (em redor dos dois furos) – foi reclassificada internamente como zona não-crítica após se saber que, já no cliente mas ainda antes do processo de cozedura – pelo qual todos os conjuntos passam – é realizado um aperto local o que resulta numa perfeita adesão e encosto entre componentes de tal modo que possibilitou uma optimização do volume de adesivo depositado; (ii) a zona de deposição K2 (em forma de espiral) não apresenta características que dificultem extraordinariamente o processo de adesão. Assim, é realizada uma análise para cada uma das zonas onde é requerida a deposição de material adesivo K1, K2 e K3 com um interesse particular na zona de deposição K3 (com formato em “H”) devido à sua complexidade.

A partir desta análise são obtidos valores de espaçamento entre componentes para vários cortes ao longo do comprimento de cada uma das três áreas com adesivo. O método escolhido para aproximar os valores de *gap* dos componentes entre cortes consecutivos foi a média aritmética representada pela equação:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.18)$$

De forma simples, muito embora grosseira, admita-se que cada um desses valores de espaçamento é idêntico para toda a largura de cada uma das áreas correspondentes.

Então, através da expressão seguinte:

$$V = \Delta x \, z \, h \quad (3.19)$$

na qual Δx é a distância entre cortes consecutivos, z é a espessura do espaçamento entre componentes e h é largura da região a colar; é possível calcular o volume de espaçamento entre cortes consecutivos e somá-los de modo a obter o volume total de vazio entre componentes.

Em alternativa o volume pode ser expresso por:

$$V = z \, A \quad (3.20)$$

em que z corresponde ao espaçamento e A corresponde à área de colagem.

Este estudo tem por objectivo conhecer qual o volume de vazio entre componentes – nos casos nominal e limites de tolerância – e comparar com o volume de material adesivo depositado.

A Figura 3.6 pretende ilustrar uma situação análoga às zonas em estudo, de forma simplificada, tendo como referência a secção do conjunto que atravessa o eixo do furo roscado singular existente na área lateral de colagem com uma espessura arbitrária de 1 mm.

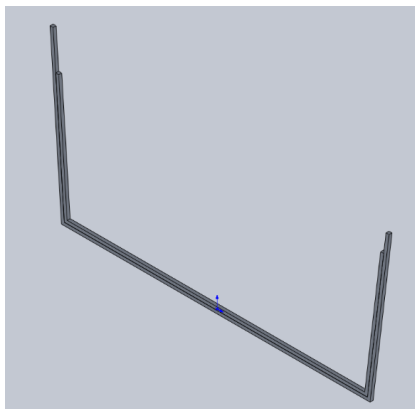
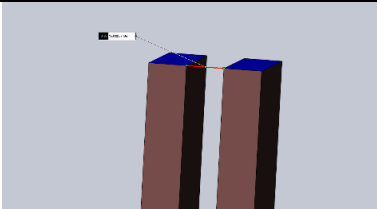
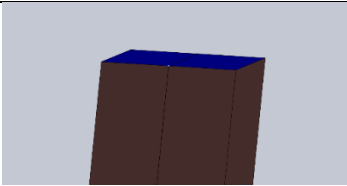
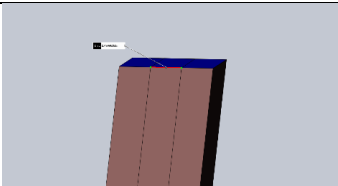


Figura 3.6 - Reprodução do perfil em estudo, de forma simplificada, uma secção de 1 mm do conjunto na condição nominal

Na Tabela 3.2 é apresentado um resumo da comparação dos casos de montagem para uma situação análoga à real (apresentada na figura acima), no caso de uma secção de 1 mm de comprimento.

Tabela 3.2 – Exemplo das situações limite de montagem para uma hipotética secção de 1 mm de comprimento

Situação	Simulação de Representação	Distância entre componentes [mm]
Gap (ajustamento com folga)		1,00
Nominal		0
Encosto “forçado” (ajustamento com aperto)		- 0,50

3.2.1 Análise dimensional à zona de deposição do cordão K1

A zona de deposição de cola a analisar localizada na base do componente principal tem como característica principal a dupla furação, é por essa razão um local especialmente propenso a fugas de adesivo. A região tem a forma semelhante a um rectângulo de 45x40 mm, à qual necessário retirar a área de cada um dos dois furos e de 2 mm em redor de cada um dos furos de modo a evitar material adesivo nos furos (como especifica o desenho e norma através da expressão *clearance*, mencionada anteriormente).

Consequentemente, a expressão que pode aproximar a área a colar será:

$$A_1 = (l_1 \times L_1) - (\pi [(r_{1.1} + k_1)^2 + (r_{1.2} + k_1)^2]) \quad (3.21)$$

na qual k é o valor de *clearance* (área livre de cola) em redor do furo.

Recorrendo ao *software* de desenho assistido por computador (CAD) *SOLIDWORKS*®, iniciámos a análise realizada seccionando o conjunto segundo dois planos de modo a obter o espaçamento entre componentes de forma rigorosa, conforme o representado na Figura 3.7.

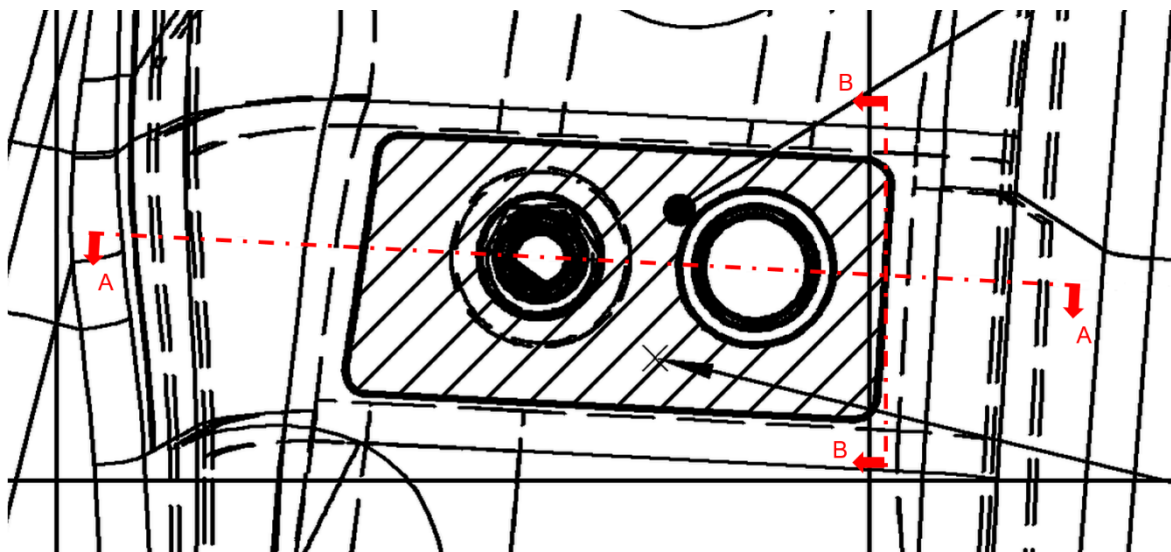
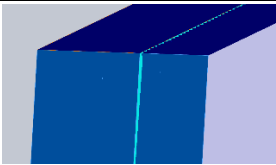
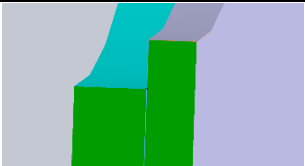
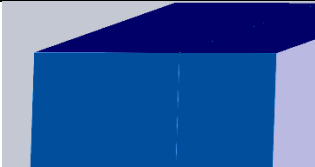

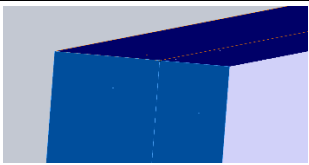


Figura 3.7 – Vista de frente do conjunto com a zona de deposição de material K1 com furo duplo a traço oblíquo

O método utilizado para avaliar o espaçamento entre componentes tem início com o corte A que divide ao meio a área de colagem, de forma aproximada, atravessando o eixo de ambos os furos nela presentes. De seguida é efectuado um corte ortogonal ao primeiro, vertical e que atravessa toda a largura da área de colagem, de forma análoga ao realizado para a região anterior.

O resultado do estudo de espaçamento entre componentes pode ser observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores de espaçamento entre componentes na região de colagem com furo duplo

Distância ao Corte B inicial [mm]	Representação dos cortes em 3D	Distância ente componentes [mm]
0		—
17		—
29,27		—
42,48		—
62,48		—

Com base nos dados da Tabela 3.3 acima é possível observar que para a condição nominal, na zona considerada, o desenho não contempla qualquer tipo de espaçamento entre componentes o que resulta num ajustamento perfeito. Deste modo, apenas as tolerâncias dimensionais de cada um deles poderão alterar esta situação.

Ainda assim, muito embora não seja contemplado qualquer espaçamento para a condição nominal, os desenhos 2D admitem – como já vimos – variações dimensionais devido às tolerâncias. Portanto, analisando os casos limites, para esta situação, existem duas possibilidades:

- o caso em que o componente principal tenha as abas laterais na cota limite superior (com +0,5 mm que a cota nominal, no sentido divergente entre abas) e o reforço interior tenha as suas abas laterais na cota limite inferior (com +0,5 mm que a cota nominal, no sentido divergente entre abas);
- o caso em que o componente principal tenha as abas laterais na cota limite inferior (com -0,5 mm que a cota nominal, no sentido convergente entre abas) e o reforço interior tenhas as abas laterais na cota limite superior (precisamente na cota nominal).

Assumindo que para ambos os casos, (i) e (ii), o valor da diferença resultante da distância entre abas e a cota nominal entre abas é constante ao longo de todo o comprimento das áreas de colagem (de cada um dos componentes); então, através das expressões (3.20) e (3.21) é possível estimar os valores de espaçamento na zona de deposição K1.

Ora os dados da Tabela 3.2 relativos ao valor de z_1 para o caso (i) apresentam o valor de $z_{2,i} = 1 \text{ mm}$ então o volume do espaçamento entre componentes quando o "gap" é máximo será,

$$V_{1.i_T} = z_{1.i} A_1 = (1)[(40 \times 45) - (\pi [(5,5 + 2)^2 + (7,5 + 2)^2])] = 1339,76 \text{ mm}^3 \quad (3.22)$$

e para o caso (ii), conhecendo o valor de $z_{2,ii} = 0 \text{ mm}$, o volume de espaçamento para quando o encosto é com aperto, obtém-se,

$$V_{1.ii_T} = z_{1.ii} A_1 = (0)[(40 \times 45) - (\pi [(5,5 + 2)^2 + (7,5 + 2)^2])] = 0 \text{ mm}^3 \quad (3.23)$$

A Tabela 3.4 seguinte apresenta os resultados das equações (3.22) e (3.23), da Tabela 2.2 para o cordão K1 e compara-os entre eles.

Tabela 3.4 - Comparação de volumes de "gap", de cola especificada no desenho de conjunto e de cola aproximadamente depositada para o caso do cordão K2

Situação	Volume "gap" [mm ³]	Volume cola spec 2D [mm ³]	Volume cola apx [mm ³]	$\frac{spec}{gap}$	$\frac{apx}{gap}$
Nominal	0			—	—
i) Gap (ajustamento com folga)	1340	310	642	0,2	0,4
(ii) Encosto "forçado" (ajustamento com aperto)	0			—	—

3.2.2 Análise dimensional à zona de deposição do cordão K2

Contemplando a zona de deposição de material na lateral interna do componente principal onde não existe qualquer furo (K2) efectuámos a análise seccionando o conjunto segundo dois planos de modo a obter o espaçamento entre componentes de forma rigorosa, novamente com recurso ao *software* de CAD *SOLIDWORKS®*, tal como demonstra a Figura 3.8.

O formato da região onde é requerido material adesivo (K2) pode ser aproximado por um trapézio rectângulo de altura 70 mm, lado maior de 50 mm e lado menor de 30 mm, sem qualquer descontinuidade. Recordando que a área de um trapézio rectângulo é calculada a partir da expressão:

$$A_2 = \frac{y_2}{2} (l_2 + L_2) \quad (3.24)$$

em que l é o lado menor, L o lado maior e y a altura.

Assim, optámos por analisar a região de deposição de adesivo de forma análoga à realizada no ponto anterior, fazendo um corte (Figura 3.8 – corte A) na lateral, ao longo do comprimento do conjunto e sensivelmente a meio da região de deposição. A partir deste primeiro corte realizamos uma série de segundos cortes, ortogonais ao primeiro, ao longo de todo o comprimento da região de deposição de adesivo, com início no corte B da Figura 3.8.

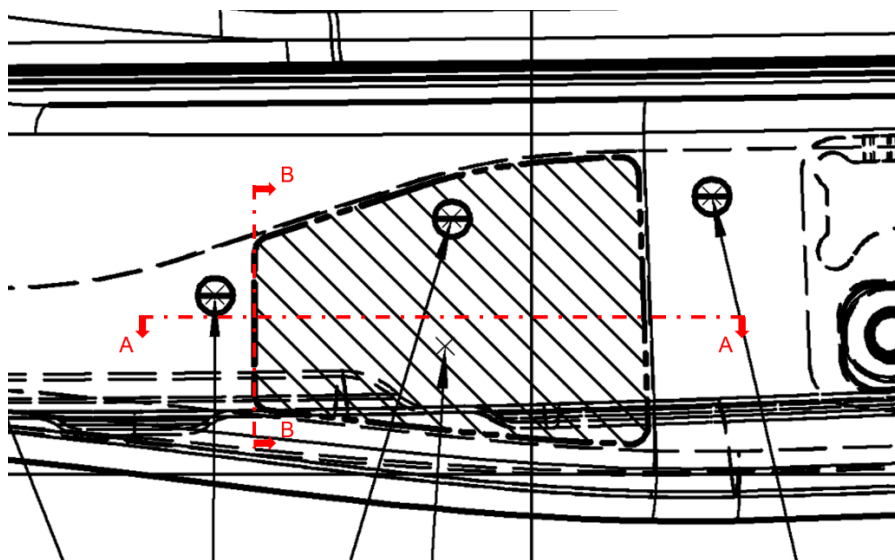
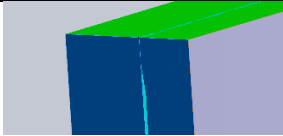
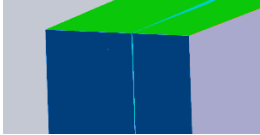
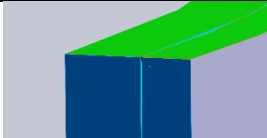
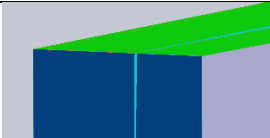
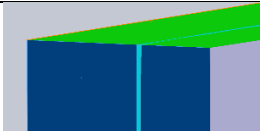


Figura 3.8 - Vista lateral do conjunto com a zona de deposição de adesivo K3 sem furo a traço oblíquo

De forma concreta, o corte inicial foi o corte A (da Figura 3.8) que divide a região K2 aproximadamente ao meio e de seguida foi feito um corte ortogonal a este (corte B). A partir deste corte foram feitos mais quatro, paralelos ao corte inicial e distanciados de 10 mm entre si. O resultado da distância entre componentes na linha de intersecção do corte A com o corte B e cada um dos seguintes, vem apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Valores de *gap* entre componentes na região de colagem sem furação

Distância ao Corte B inicial [mm]	Representação dos cortes em 3D	Distância ente componentes [mm]
0		—
20		—
40		—
60		—
68		—

A partir dos dados da Tabela 3.5 é possível perceber que para a condição nominal, segundo a representação 3D, não é considerado qualquer espaçamento entre componentes.

Seguindo um método de raciocínio análogo ao realizado no ponto anterior, compete neste momento estudar as situações limite de montagem do conjunto inerentes a situações limite de tolerância dos componentes. Nesse sentido, afigura-se pertinente recordar os casos (i) – componente principal com as abas laterais na cota limite superior (“divergentes”) e reforço interior com as abas laterais na cota limite inferior (“convergentes”) – e (ii) – componente principal com as abas laterais na cota limite inferior (“convergente”) e o reforço interior com as abas laterais na cota limite inferior (nominal).

Reforçando que assumimos que para ambos os casos limite o valor da diferença resultante da cota entre abas e a cota nominal entre abas é constante ao longo de todo o comprimento das áreas de colagem (de cada um dos componentes); então, através da equação (3.20) e da equação (3.24) é possível chegar a volume total de espaçamento aproximado.

Sabemos da Tabela 3.2 que para o caso (i) o valor de $s_{2.i} = 1$ mm então,

$$V_{2.i_T} = z_{2.i} A_2 = (1) \left[\frac{70}{2} (30 + 50) \right] = 2800 \text{ mm}^3 \quad (3.25)$$

mais ainda, da mesma tabela, para o caso (ii) é válido $z_{2.ii} = 0$ mm o que resulta em,

$$V_{2.ii_T} = z_{2.ii} A_2 = (0) \left[\frac{70}{2} (30 + 50) \right] = 0 \text{ mm}^3 \quad (3.26)$$

A Tabela 3.6 seguinte apresenta os resultados das equações (3.25) e (3.26), da Tabela 2.2 para o cordão K2 e compara-os entre eles.

Tabela 3.6 - Comparação de volumes de "gap", de cola especificada no desenho de conjunto e de cola aproximadamente depositada para o caso do cordão K2

Situação	Volume "gap" [mm ³]	Volume cola spec 2D [mm ³]	Volume cola apx [mm ³]	$\frac{spec}{gap}$	$\frac{apx}{gap}$
Nominal	0			—	—
i) Gap (ajustamento com folga)	2800	560	1539	0,2	0,6
(ii) Encosto "forçado" (ajustamento com aperto)	0			—	—

3.2.3 Análise dimensional à zona de deposição do cordão K3

A análise da zona de deposição de material adesivo localizada na lateral do componente principal com furo simples foi feita de forma seccional e através dos desenhos tridimensionais de conjunto. Esta região de formato aproximadamente rectangular é compreendida por um comprimento e largura de cerca de 100x40 mm, menos a área do furo roscado acrescida de 2 mm em redor do furo por forma a evitar adesivo nas imediações dos furos e no interior da rosca.

Assim, a seguinte expressão traduz aproximadamente o valor da área que requer adesivo:

$$A_3 = (l_3 \times L_3) - [\pi (r_3 + k_3)^2] \quad (3.27)$$

em que k assume o valor de *clearance* imposto em redor do furo.

Nesse sentido, usando novamente o *software* de CAD *SOLIDWORKS®*, foi retomado o método anteriormente utilizado de seccionar o conjunto segundo dois planos de modo a obter o espaçamento entre componentes de forma rigorosa. A Figura 3.9 ilustra o método seguido para obter os cortes no conjunto.

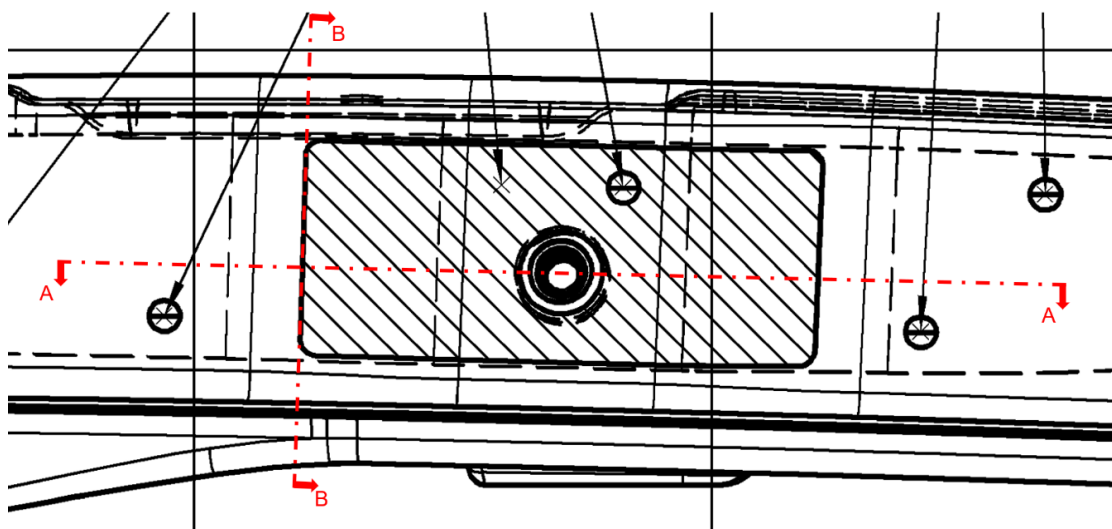


Figura 3.9 - Vista lateral do conjunto com a zona de deposição de adesivo com furo simples a traço oblíquo

Concretizando, é efectuado um corte no plano que contém o eixo vertical do furo (demonstrado pelo corte A da Figura 3.9) e a partir deste corte é feita uma outra secção ortogonal à secção anterior (corte B da Figura 3.9) de modo a ser possível obter a distância entre dois pontos comuns aos dois planos ortogonais.

Os resultados das medições aos cortes efectuados encontram-se demonstrados na Tabela 3.7.



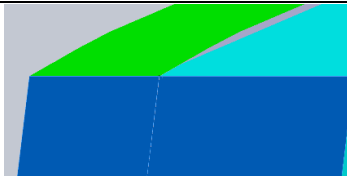

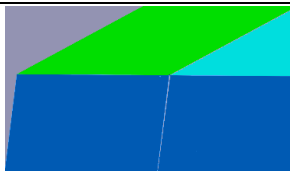
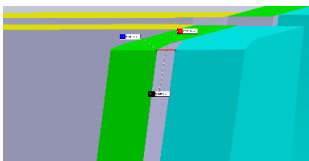
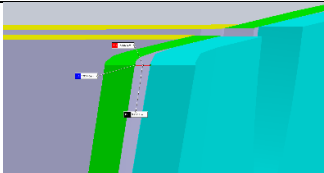
Como é possível observar na Tabela 3.7, os valores apresentados retratam um encosto perfeito entre componentes na zona imediatamente adjacente ao furo – zona interplanar, paralela à secção em estudo, de cerca de 40 mm de comprimento e centrada no furo – e uma pequena folga nas zonas mais afastadas– até cerca 0,5 mm na zona superior e até cerca de 0,15 mm na zona inferior. Todos os valores acima considerados são medidos a partir da representação 3D que é feita a partir de cotas nominais.

Neste sentido torna-se imperativo estudar os casos limite de montagem análogos aos casos (i) e (ii) retratados no ponto anterior.

Assim, considerando o caso (i), e sabendo que existe encosto perfeito para a condição nominal na zona imediatamente adjacente ao furo, a cota limite máxima do componente principal (+0,5 mm, sentido divergente das abas) e a cota limite mínima do reforço interior (-0,5 mm, sentido convergente das abas) implicam que se forme um *gap* entre componentes de 1,00 mm. Estamos perante uma situação de ajustamento com folga.

No caso (ii), tendo novamente como referência a situação nominal de encosto perfeito, a cota limite mínima do componente principal (-0,5 mm, sentido “convergente” das abas) e a cota limite máxima do reforço interior (nominal) resulta numa hipotética sobreposição de faces no valor de 0,5 mm. Na realidade, neste caso, estaremos perante uma situação de ajustamento com aperto.

Tabela 3.7 - Valores da distância entre componentes no plano do eixo vertical do furo

Distância ao Corte B inicial [mm]	Representação dos cortes em 3D	Distância ente componentes [mm]
0		0,10
18		0,13
38		—
53,84		—
73		—
93		0,39
103		0,54

Tendo em conta os valores de espaçamento apresentados na Tabela 3.7 é possível obter valores aproximados para o volume de material adesivo teoricamente requerido com base no volume entre componentes.

Consequentemente, assumindo que o valor de espaçamento entre componentes é o mesmo ao longo de todo o comprimento da zona onde é requerido material adesivo (corte B da Figura 3.9), assumindo que o valor do *gap* pode ser aproximado – de forma simplista – pela

equação (3.18) nos 38 mm iniciais do corte B, e pode também ser aproximado pela mesma equação dos 73 mm aos 103 mm de distância do corte B; então, multiplicando cada um destes valores aproximados de espaçamento “local” pela largura da zona onde é requerido adesivo, é possível calcular o volume do espaçamento entre componentes “local” e o volume do espaçamento de toda a região.

De forma concreta sabendo que o vazio entre os dois componentes e com base na expressão (3.18):

- Nos 18 mm iniciais pode ser aproximado por,

$$\overline{z}_{3.1} = \frac{0,10+0,13}{2} = 0,12 \text{ mm}$$

- Dos 18 aos 38 mm é possível aproximar por,

$$\overline{z}_{3.2} = \frac{0,13+0}{2} = 0,07 \text{ mm}$$

- Dos 73 aos 93 mm a aproximação resulta,

$$\overline{z}_{3.3} = \frac{0+0,39}{2} = 0,20 \text{ mm}$$

- Dos 93 aos 103 mm resulta,

$$\overline{z}_{3.4} = \frac{0,39+0,54}{2} = 0,47 \text{ mm}$$

Então, substituindo os valores na equação (3.20) assumindo estes valores como uniformes ao longo de toda a largura da zona de colagem, temos:

$$V_{3.1} = \Delta x_{01} \overline{z}_{3.1} h_3 = (18 - 0) \times 0,12 \times 40 = 86,4 \text{ mm}^3$$

$$V_{3.2} = \Delta x_{12} \overline{z}_{3.2} h_3 = (38 - 18) \times 0,07 \times 40 = 56 \text{ mm}^3$$

$$V_{3.3} = \Delta x_{23} \overline{z}_{3.3} h_3 = (93 - 73) \times 0,20 \times 40 = 160 \text{ mm}^3$$

$$V_{3.4} = \Delta x_{34} \overline{z}_{3.4} h_3 = (103 - 93) \times 0,47 \times 40 = 188 \text{ mm}^3$$

Deste modo, o volume total nominal aproximado do *gap* entre componentes é obtido:

$$V_{3T} = V_{3.1} + V_{3.2} + V_{3.3} + V_{3.4} \quad (3.28)$$

$$V_{3T} = 86,4 + 56 + 160 + 188 = 490,4 \text{ mm}^3 = 0,49 \text{ cm}^3 \quad (3.29)$$

Analisemos então os volumes associados aos casos limite de tolerância considerados anteriormente:

- Caso (i) – situação de ajustamento com folga de +1 mm de espaçamento ao longo de todo o comprimento – implica um incremento no volume considerado de,

$$V_{3.i} = z_{3.i}A_3 = 1 \times 100 \times 40 = 4000 \text{ mm}^3 = 4 \text{ cm}^3$$

O que se traduz num volume total para o caso limite (i) de,

$$V_{3.iT} = V_{3T} + V_{3.i} = 490,4 + 4000 = 4490,4 \text{ mm}^3 = 4,49 \text{ cm}^3 \quad (3.30)$$

- Caso (ii) – situação de ajustamento com aperto (encosto “forçado”) com um valor de -0,5 mm (ou seja, uma “sobreposição”) – resulta num novo valor de espaçamento total,

$$V_{3.ii} = 0,5 \times 100 \times 40 = 2000 \text{ mm}^3$$

$$V_{3.iiT} = V_{3T} - V_{3.ii} = 490,4 - 2000 = -1509,6 \text{ mm}^3 = -1,51 \text{ cm}^3 \quad (3.31)$$

em teoria o volume seria negativo e por isso existiria uma “sobreposição” entre componentes, como tal não é fisicamente possível, na realidade o que acontece é um ajustamento com aperto.

A Tabela 3.8 seguinte apresenta os volumes teóricos de espaçamento entre componentes na região de colagem K3 para o caso nominal (equação (3.29)) e cada um dos casos limite de tolerância (equações (3.30) e (3.31)).

Tabela 3.8 - Volume teórico de espaçamento entre componentes na região de colagem K3

Situação	Volume “gap” [mm ³]	Volume cola spec 2D [mm ³]	Volume cola apx [mm ³]	$\frac{spec}{gap}$	$\frac{apx}{gap}$
Nominal	490			1,6	4,3
i) Gap (ajustamento com folga)	4490	790	2106	0,2	0,5
(ii) Encosto “forçado” (ajustamento com aperto)	0			–	–

4 Propostas e intervenção

No seguimento do estudo preliminar realizado acima foi proposto reduzir a quantidade de cola depositada, bem como redefinir o trajecto de alguns troços dos cordões de modo a evitar fugas de material para zonas indesejadas, como é o caso das roscas dos furos.

Aquando da apresentação desta proposta de optimização de deposição de material adesivo a Empresa, e em particular o processo em estudo, encontrava-se numa fase de incremento produtivo o que, muito embora não faça esquecer a pertinência do presente trabalho, faz evidenciar e amplificar a relevância e preponderância de outros aspectos. Por esta razão e porque o reajuste do trajecto dos cordões – para cada uma das mesas – implicaria tempo de paragem de máquina que então não era possível obter, adoptou-se inicialmente a proposta de redução da quantidade de cola depositada.

4.1 Redução do volume de adesivo depositado

Antes da apresentação da proposta de redução de volume de cola o ajuste realizado ao volume depositado apenas se realizava quando surgiam conjuntos com adesivo a sobejar através dos furos ou quando a realização do ensaio destrutivo aos conjuntos detectava uma dose de adesivo inferior à especificada; ou seja, estávamos perante um ajuste reactivo.

No seguimento da proposta apresentada, bem como informações recolhidas no cliente sobre os processos subsequentes a que os conjuntos são sujeitos levaram a Empresa a seguir o caminho recomendado e reduzir o volume de material depositado de forma gradual.

Os dados na Tabela 4.1 seguinte foram retirados após a primeira grande redução de volume de cola e apresentam os volumes de adesivo nominais – imposto na programação do controlador de dosagem – e os valores reais – resposta do sistema à imposição nominal do controlador – e, o erro do volume efectivamente depositado em relação ao volume nominal definido no controlador e bem como a diferença entre o volume depositado e o volume especificado em desenho de conjunto para cada um dos cordões de deposição. A recolha de dados foi realizada num só ensaio, no decurso da produção normal.

De forma usual nas semanas seguintes vão sendo realizados ajustes pontuais, de forma reactiva, consoante as necessidades inerentes às variações dimensionais apresentadas pelos lotes armazenados. Então, foram recolhidos mais dados sobre o volume depositado de forma a tentar perceber a evolução da proposta. Para isso, os dados foram recolhidos de forma mais exaustiva através de oito conjuntos por cada mesa de soldadura, o que representa um total de 32 conjuntos analisados e 96 valores de volume recolhidos; por essa razão as tabelas serão apresentadas por cordão.

Tabela 4.1 - Quantidade de material depositado na semana W

Cordão	Mesa	Volume especificado 2D [cm ³]	Volume nominal [cm ³]	Volume real [cm ³]	ε [%]	$\bar{\varepsilon}$ [%]	Factor <i>real</i> <i>spec</i>
K1	MesaEsq1_E1	0,31	1,17	1,19	1,7	3,2	3,8
	MesaEsq2_E1		0,83	0,84	1,2		2,7
	MesaDir3_E1		0,59	0,63	6,8		2,0
	MesaDir4_E1		0,64	0,66	3,1		2,1
K2	MesaEsq1_E1	0,56	1,62	1,64	1,2	1,6	2,9
	MesaEsq2_E1		1,18	1,20	1,7		2,1
	MesaDir3_E1		1,36	1,39	2,2		2,5
	MesaDir4_E1		1,42	1,44	1,4		2,6
K3	MesaEsq1_E1	0,79	2,02	2,04	1,0	0,8	2,6
	MesaEsq2_E1		2,41	2,42	0,4		3,1
	MesaDir3_E1		1,66	1,68	1,2		2,1
	MesaDir4_E1		2,14	2,15	0,5		2,7

A Tabela 4.2 apresenta os valores de volume recolhidos para o cordão K1.

A **Error! Reference source not found.** representa a variação do volume depositado no cordão K1.

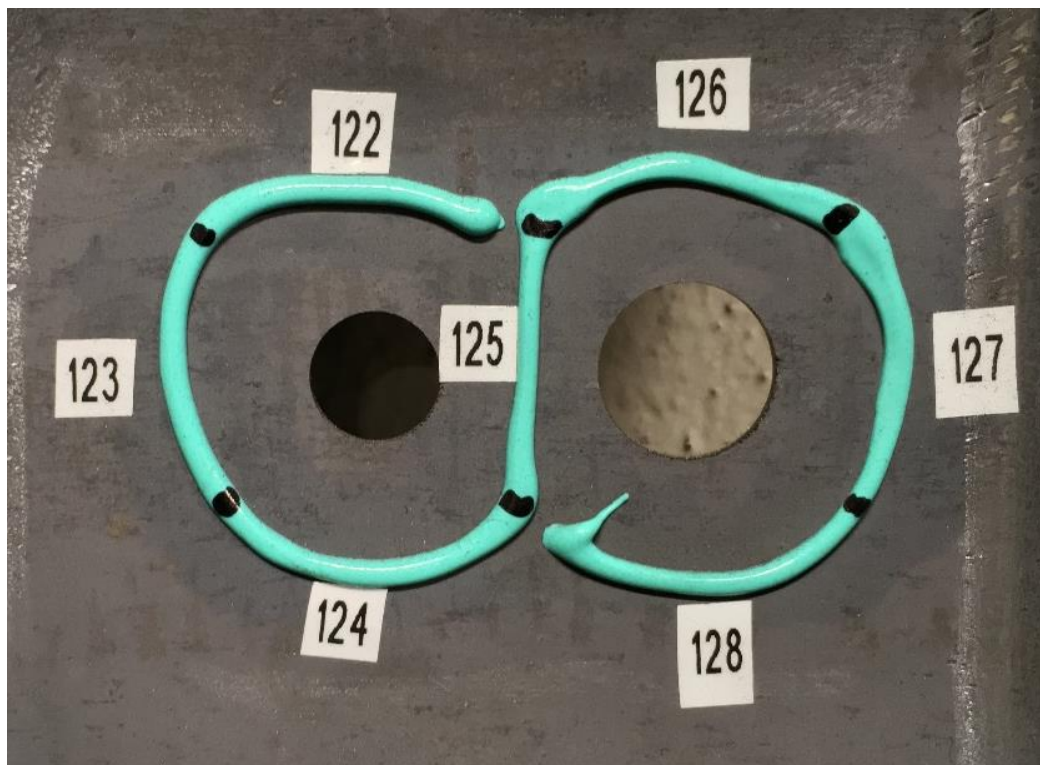


Figura 4.1 - Imagem do cordão K1 cozido após ajuste

Tabela 4.2 - Quantidade de material depositado em K1 na semana W+2

Cordão	Mesa	Volume especificado 2D [cm³]	Volume nominal [cm³]	Volume real [cm³]	ε [%]	$\bar{\varepsilon}$ [%]	Factor $\left[\frac{real}{spec}\right]$
K1	MesaEsq1_E1	0,31	1,06	1,20	13,2	12,3	3,8
	MesaEsq1_E2			1,19	12,3		
	MesaEsq1_E3			1,19	12,3		
	MesaEsq1_E4			1,19	12,3		
	MesaEsq1_E5			1,19	12,3		
	MesaEsq1_E6			1,19	12,3		
	MesaEsq1_E7			1,19	12,3		
	MesaEsq1_E8			1,18	11,3		
	MesaEsq2_E1	0,31	0,61	0,61	0	1,0	2,0
	MesaEsq2_E2			0,60	-1,6		
	MesaEsq2_E3			0,62	1,6		
	MesaEsq2_E4			0,63	3,3		
	MesaEsq2_E5			0,60	-1,6		
	MesaEsq2_E6			0,62	1,6		
	MesaEsq2_E7			0,62	1,6		
	MesaEsq2_E8			0,63	3,3		
	MesaDir3_E1	0,31	0,59	0,73	23,7	23,1	2,3
	MesaDir3_E2			0,73	23,7		
	MesaDir3_E3			0,75	27,1		
	MesaDir3_E4			0,74	25,4		
	MesaDir3_E5			0,72	22,0		
	MesaDir3_E6			0,72	22,0		
	MesaDir3_E7			0,71	20,3		
	MesaDir3_E8			0,71	20,3		
	MesaDir4_E1	0,31	0,63	0,75	19,0	19,2	2,4
	MesaDir4_E2			0,75	19,0		
	MesaDir4_E3			0,75	19,0		
	MesaDir4_E4			0,77	22,2		
	MesaDir4_E5			0,75	19,0		
	MesaDir4_E6			0,74	17,5		
	MesaDir4_E7			0,75	19,0		
	MesaDir4_E8			0,75	19,0		

De seguida a Tabela 4.3 apresenta os dados para o cordão K2.

Tabela 4.3 - Quantidade de material depositado em K2 na semana W+2

Cordão	Mesa	Volume especificado 2D [cm³]	Volume nominal [cm³]	Volume real [cm³]	ε [%]	$\bar{\varepsilon}$ [%]	Factor $\left[\frac{real}{spec}\right]$
K2	MesaEsq1_E1	0,56	0,56	0,55	-1,8	-0,4	1,0
	MesaEsq1_E2			0,57	1,8		
	MesaEsq1_E3			0,56	0		
	MesaEsq1_E4			0,57	1,8		
	MesaEsq1_E5			0,56	0		
	MesaEsq1_E6			0,55	-1,8		
	MesaEsq1_E7			0,55	-1,8		
	MesaEsq1_E8			0,55	-1,8		
	MesaEsq2_E1	0,56	0,56	0,71	26,8	22,8	1,2
	MesaEsq2_E2			0,71	26,8		
	MesaEsq2_E3			0,69	23,2		
	MesaEsq2_E4			0,67	19,6		
	MesaEsq2_E5			0,70	25,0		
	MesaEsq2_E6			0,67	19,6		
	MesaEsq2_E7			0,68	21,4		
	MesaEsq2_E8			0,67	19,6		
	MesaDir3_E1	0,56	0,77	0,77	0	-1,3	1,4
	MesaDir3_E2			0,76	-1,3		
	MesaDir3_E3			0,75	-2,6		
	MesaDir3_E4			0,75	-2,6		
	MesaDir3_E5			0,77	0		
	MesaDir3_E6			0,75	-2,6		
	MesaDir3_E7			0,76	-1,3		
	MesaDir3_E8			0,77	0		
	MesaDir4_E1	0,56	0,79	0,81	2,5	1,6	1,4
	MesaDir4_E2			0,81	2,5		
	MesaDir4_E3			0,82	3,8		
	MesaDir4_E4			0,79	0		
	MesaDir4_E5			0,79	0		
	MesaDir4_E6			0,80	1,3		
	MesaDir4_E7			0,81	2,5		
	MesaDir4_E8			0,79	0		

A Figura 4.2 seguinte apresenta o cordão K2 após o pequeno ajuste efectuado.

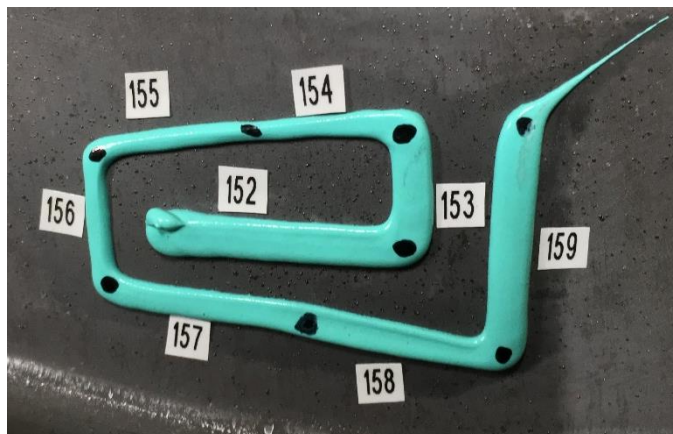


Figura 4.2 - Imagem do cordão K2 cozido após ajuste

Abaixo a Tabela 4.4 apresenta os valores recolhidos para o cordão K3.

Os ajustes realizados ao cordão K3 estão representados na Figura 4.3 seguinte.



Figura 4.3 - Imagem do cordão K3 cozido após ajuste

Tabela 4.4 - Quantidade de material depositado em K3 na semana W+2

Cordão	Mesa	Volume especificado 2D [cm³]	Volume nominal [cm³]	Volume real [cm³]	ε [%]	$\bar{\varepsilon}$ [%]	Factor $\left[\frac{real}{spec.}\right]$
K3	MesaEsq1_E1	0,79	2,28	2,41	5,7	4,9	3,0
	MesaEsq1_E2			2,35	3,1		
	MesaEsq1_E3			2,40	5,3		
	MesaEsq1_E4			2,41	5,7		
	MesaEsq1_E5			2,39	4,8		
	MesaEsq1_E6			2,39	4,8		
	MesaEsq1_E7			2,40	5,3		
	MesaEsq1_E8			2,39	4,8		
	MesaEsq2_E1	0,79	2,61	2,90	11,1	9,7	3,6
	MesaEsq2_E2			2,90	11,1		
	MesaEsq2_E3			2,89	10,7		
	MesaEsq2_E4			2,83	8,4		
	MesaEsq2_E5			2,85	9,2		
	MesaEsq2_E6			2,84	8,8		
	MesaEsq2_E7			2,86	9,6		
	MesaEsq2_E8			2,84	8,8		
	MesaDir3_E1	0,79	2,63	2,74	4,2	4,1	3,5
	MesaDir3_E2			2,74	4,2		
	MesaDir3_E3			2,75	4,6		
	MesaDir3_E4			2,74	4,2		
	MesaDir3_E5			2,74	4,2		
	MesaDir3_E6			2,73	3,8		
	MesaDir3_E7			2,73	3,8		
	MesaDir3_E8			2,74	4,2		
	MesaDir4_E1	0,79	2,68	2,80	4,5	3,6	3,5
	MesaDir4_E2			2,78	3,7		
	MesaDir4_E3			2,80	4,5		
	MesaDir4_E4			2,79	4,1		
	MesaDir4_E5			2,76	3,0		
	MesaDir4_E6			2,76	3,0		
	MesaDir4_E7			2,76	3,0		
	MesaDir4_E8			2,77	3,4		

4.2 Redefinição de parte do trajecto do cordão K3

O cordão K3 desde bastante cedo que se revelou complexo devido ao formato dos componentes na zona onde é requerida a sua deposição e às tolerâncias dimensionais envolvidas, como pudemos constatar aquando da análise dimensional.

Após a intervenção de modo a reduzir a quantidade adesivo depositado foi adoptada por parte da Empresa a proposta de reajuste de parte do trajecto do cordão K3 – com especial incidência no troço horizontal que está acima do furo do cordão – devido à quantidade de material depositada e também à proximidade do furo. O objectivo não é redefinir drasticamente a trajectória pois o estado do projecto não contempla possibilidade de paragens de máquina em tempo suficiente para fazer um estudo criterioso sobre a trajectória óptima para o cordão K3 tendo detalhadamente em conta as especificidades dimensionais, a variabilidade induzida pelas tolerâncias associadas a ambos os componentes envolvidos e bem como o efeito do aperto efectuado pelas pinças de soldadura por pontos; mas passa antes por transladar apenas dois pontos por forma a provocar o afastamento do troço do cordão mais próximo do furo presente na região do cordão K3. Assim, foi proposto encurtar os troços anterior e posterior ao indicado (i) transladando o ponto final do troço 144 (ver Figura 4.4) 2 mm no sentido de se afastar do furo e (ii) transladando o ponto inicial do troço 146 também 2mm no sentido de se afastar do furo por forma a garantir uma translação global do troço 145 que une os dois pontos de aproximadamente 2 mm (ver Figura 4.4).

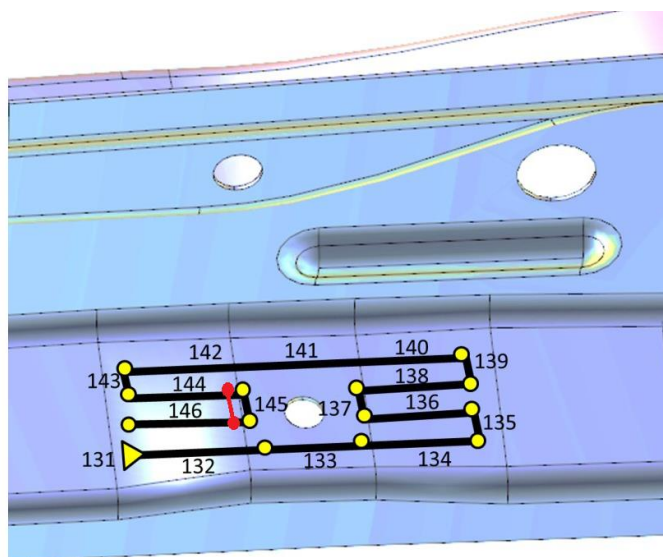


Figura 4.4 - Esquemática da translação do troço do cordão K3, a vermelho o novo troço 145

Mais ainda, ao provocar um encurtamento dos troços do cordão estamos indirectamente a reduzir o volume depositado e a beneficiar, de uma outra forma, a proposta apresentada anteriormente.

4.3 Reformulação do processo de validação do lote produzido

Com o ajuste realizado ao volume de adesivo depositado e a o ajuste feito ao troço de um dos cordões de deposição foi sendo cada vez mais evidente a demora na validação dos lotes após os ajustes realizados. Isto porque no seguimento de um ajuste é necessário que o primeiro conjunto, de todas as mesas, que tenha cordões com alterações seja retirado da linha de produção – depois de terminado – para ser cozido no forno industrial e de seguida se realizar um ensaio destrutivo analisando a percentagem da região de colagem que está efectivamente preenchida com adesivo.

O Ensaio Destrutivo (ED) é a aplicação de metodologias de teste destrutivas para examinar um objecto, material ou sistema. No caso concreto em análise o objectivo é observar o preenchimento da área de colagem requerida através do arrancamento dos dois componentes (componente principal e reforço interior), ou seja, da destruição do conjunto.

O ensaio proposto (END) consiste nas seguintes etapas a realizar entre OP3 e OP4, com a máquina parada:

- Encaixe do sistema de simulação de aperto no componente principal
- Actuação manual do grampo de aperto
- Remoção do sistema de simulação de aperto
- Remoção do reforço interior
- Observação/registo fotográfico das zonas com adesivo
- Recolocação do reforço interior
- Retomar do processo

Para este efeito foi concebido pelo departamento de manutenção um sistema de aperto responsável por simular a pressão realizada pelas pinças de soldadura por pontos na zona onde existe colagem (K3) com o objectivo de melhor simular a situação final de contacto entre os dois componentes.

Compete ainda referir que o lote só é validado se a área especificada para a colagem não estiver vazia de material adesivo em 20% ou mais – segundo a norma do cliente em vigor aquando da contratação –, ou seja, é necessário garantir um preenchimento superior a 80% da área de colagem para o lote estar OK. No entanto, ainda antes do aumento produtivo uma nova norma foi emitida em que se altera esta condição estabelecendo então que a área não-preenchida não pode ser igual ou maior que 40%.

A morosidade do processo de validação e o aumento produtivo vieram suscitar a necessidade de se encontrarem ferramentas para agilizar o processo de validação, em particular a implementação de um Ensaio Não Destrutivo (END). A definição de Ensaio Não Destrutivo consiste na aplicação de metodologias de teste para examinar um objecto, material ou sistema, sem prejuízo das suas propriedades, desempenho ou utilidade futura [10].

Com este objectivo foi proposta a possibilidade de logo após o ajuste ao volume do cordão ser feito um teste à região de colagem com a cola ainda “molhada” (não-cozida).

A discussão da proposta com a Empresa concretizou o objectivo em criar um mecanismo amovível com encaixe no componente principal e com um grampo de aperto que, após a

deposição da cola e da colocação do reforço interior no componente principal, o operador consiga utilizar para simular o aperto criado pelas pinças de soldadura na zona do cordão K3 e consequentemente simular o escoamento de material que acontece aquando da soldadura; de seguida, retirando o mecanismo de aperto, avaliar a dispersão da cola de modo a poder validar o lote. Na prática é necessário fazer este ensaio no meio do ciclo de produção – entre a OP3 e a OP4, na mesma estação de trabalho em que o operador coloca a chapa de fecho no componente principal (ver Figura 2.6) – de modo a obter resultados mais expeditos.

Contudo, a consagração deste novo método implica necessariamente a sua validação prévia. A validação do método proposta passa por com um marcador e utilizando os calibres de representação da área de colagem empregues no ED marcar no conjunto a região de colagem, utilizar o mecanismo amovível para simular o aperto entre os dois componentes e a dispersão da cola e registar a forma de dispersão com uma fotografia; por último é necessário que aquele mesmo conjunto continue o processo produtivo corrente e de seguida seja submetido ao ED, registando o resultado através de uma fotografia. A última etapa de validação é utilizando o *software DraftSight™* no qual manualmente delimitamos a zona de colagem previamente marcada com o marcador, registamos o valor indicado para a área, de seguida é possível subtrair as áreas vazias e obter a área real ocupada e consequentemente obter a percentagem da área determinada que efectivamente está preenchida.

O facto do cordão K3 ser o mais complexo por todas explicitadas anteriormente (formato irregular associado a tolerâncias dimensionais altas, com furação no meio e com um ponto de soldadura) fez com que o mecanismo amovível fosse adaptado especificamente para a região onde está o cordão K3 e por uma questão de espaço apenas foi possível colocar um grampo para essa zona. Ou seja, nenhuma das zonas associadas aos cordões K1 e K2 tem grampo de aperto neste mecanismo.

A Tabela 4.5 seguinte apresenta os dados recolhidos com recurso ao *DraftSight™* para cordão de cola K3.

Tabela 4.5 – Análise da taxa de preenchimento da região de colagem do cordão K3

Cordão	Taxa de preenchimento		Δ [pp]
	Molhado [%]	Seco [%]	
MesaEsq1_K3_12	91	91	–
MesaEsq2_K3_12	93	93	–
MesaDir3_K3_12	81	83	2
MesaEsq1_K3_19	90	96	6
MesaEsq2_K3_19	87	92	5
MesaDir3_K3_19	81	87	6
MesaDir4_K3_19	86	86	–

Por conseguinte o processo é reformulado tal como proposto e esquematicamente sumariado na Figura 4.5 que se segue.

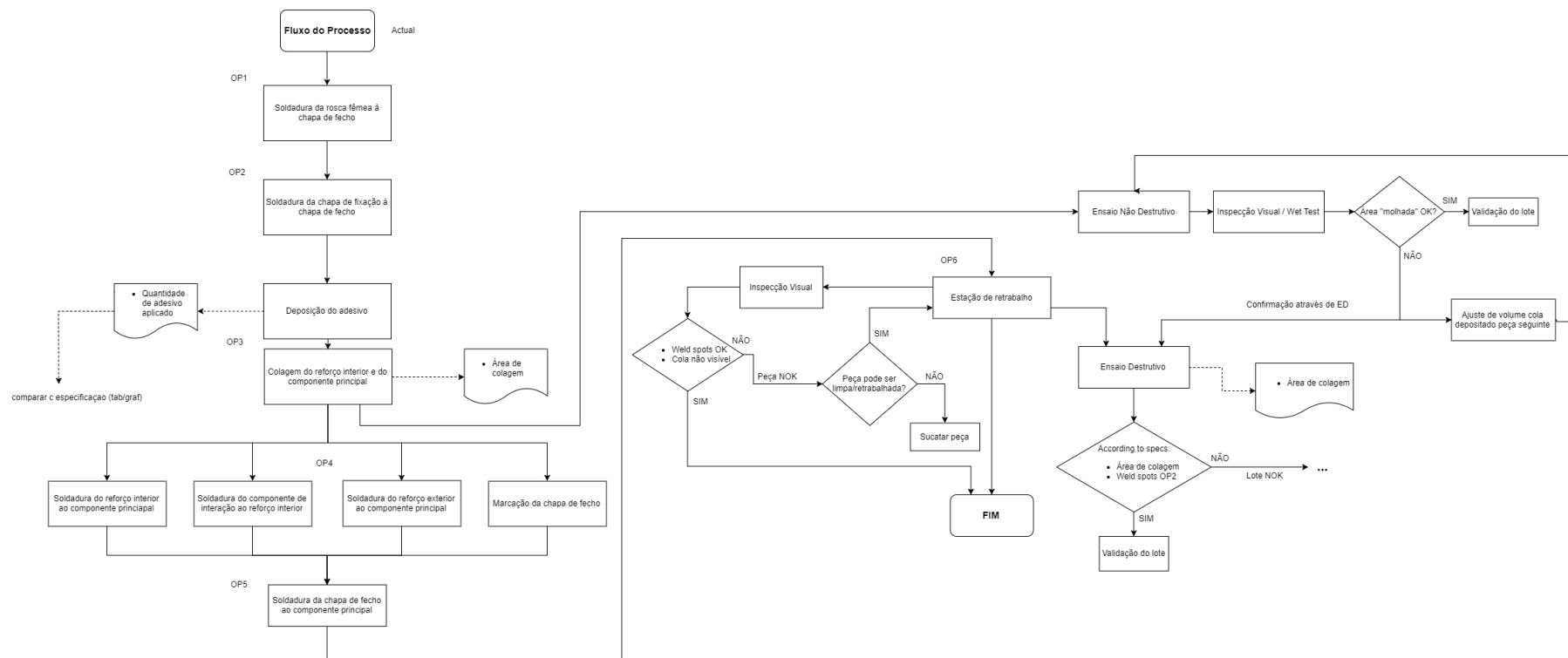


Figura 4.5 - Fluxograma do processo actual

5 Conclusão e estudos futuros

Na primeira etapa do trabalho analisámos as especificações do conjunto. Dessa análise retivemos que os valores de tolerâncias geométricas utilizados podem, mediante certas condições e cumprindo os requisitos, não dar montagem numa fase subsequente do processo no cliente final; já no caso das especificações do conjunto que concernem ao volume adesivo e área a preencher, o facto de a espessura de adesivo indirectamente especificada ser igual para todas as regiões de colagem (K1, K2 e K3) implica que as especificações imponham uma distância entre componentes igual para todas as regiões, não obstante a possibilidade de os valores de *gap* poderem ser distintos.

Numa segunda etapa, foi analisado o estado inicial do processo com recurso a medições dos cordões de deposição de material adesivo. Os resultados apresentados na Tabela 4.1 demonstram que para o cordão K1 o volume depositado é aproximadamente duas vezes superior; para os casos K2 e K3 o volume depositado é cerca de três vezes superior. Esta diferença poderá encontrar explicação no facto de o cordão K1 ter sido optimizado pois é possível simular (em contexto de ED) a sua condição final que é de contacto “perfeito” devido ao aperto uniforme a que a zona é sujeita ainda antes da cura do material adesivo; enquanto que no caso dos cordões K2 e K3, nenhuma das regiões de colagem é sujeita a aperto de modo a garantir uma dispersão minimamente uniforme do adesivo e por isso ser possível o ajuste da deposição com maior precisão.

A análise da região do cordão K1 e do volume do espaçamento entre componentes, comparando com o volume de cola especificado revela em primeiro lugar que a deposição aproximada de cola é cerca de 2 vezes superior à especificada, ainda que o espaçamento nominal seja nulo. Ainda assim, no caso limite do ajustamento com folga, quer o volume especificado quer o aproximadamente depositado não são suficientes para preencher o espaçamento resultante. Este facto não se revela, contudo, relevante, pois o conjunto nesta região sofre um aperto que garante a dispersão uniforme e completa de todo o material adesivo depositado.

No caso da região associada ao cordão K2 o volume de espaçamento entre componentes, comparando com o volume de cola especificado, demonstra que a deposição aproximada é cerca de 3 vezes maior do que especificação. Esta situação poderá ser justificada pelo facto existir um ponto de soldadura nesta região – que necessariamente provoca a diminuição do espaçamento entre componentes – e ainda por não existir qualquer zona crítica através da qual ocorra dispersão do material adesivo. Assim, a importância de controlar de forma exaustiva a deposição de cola nesta região é reduzida. Por sua vez, a região do cordão K3 pela sua geometria mais complexa resulta num espaçamento nominal que é necessário preencher. Tanto o volume especificado como o aproximadamente depositado garantem plenamente esse preenchimento. Ainda que exista um ponto de soldadura nesta região, no caso limite do ajustamento com folga o espaçamento aumenta significativamente, o que poderá explicar facto do volume aproximadamente depositado ser quase três vezes superior ao especificado, mesmo com uma zona crítica no centro da região.

Deste modo, tendo em conta as particularidades inerentes ao formato e toleranciamento dimensional do local do conjunto associado à área de colagem K3, os volumes de *gap* admissíveis são bastante díspares, o que poderá explicar a variabilidade do processo.

Os dados da Tabela 4.1 demonstram distintamente a diferença entre o volume efectivamente depositado e o volume especificado pelo desenho de conjunto, o primeiro é entre duas a três vezes superior ao projectado. O que confirma a bondade da aproximação realizada anteriormente na análise indirecta ao estado inicial do processo. Mais ainda, a Tabela 4.1 permite perceber que a variação entre o valor definido no controlador e o valor realmente depositado é inversamente proporcional ao aumento do volume depositado e que no caso do cordão K1 – no qual os volumes depositados são mais reduzidos que os dois outros cordões – o valor médio da variação supera os 3%.

Analisando os dados recolhidos na Tabela 4.2, na Tabela 4.3 e Tabela 4.4 observamos de forma clara um incremento nos valores de volume depositado – em particular nos cordões K1 e K3. O aumento de volume de cola depositado no cordão K3 apenas poderá encontrar explicação na hipótese de as dimensões dos lotes de componentes em armazém terem ligeiras variações associadas à tolerância dimensional dos componentes.

O caso do cordão K1 afigura-se mais complexo e poderá encontrar justificação tanto no facto de o volume especificado ao momento ser bastante mais reduzido que o inicialmente pensado, como no facto do sistema doseador poder estar no limiar mínimo de funcionamento. Consequentemente, o facto de o erro no volume de deposição aumentar com a diminuição do volume depositado poderá ser justificado com a necessidade de compensar a dispersão do erro com um aumento do volume definido no controlador de modo a garantir que mesmo quando o erro é mínimo (máximo em módulo) o volume depositado permite que o conjunto esteja OK.

Os dados da Tabela 4.5 acima permitem concluir que para o cordão K3 (onde a variação é mais crítica) a variação de taxa de preenchimento não é significativa para perturbar a validade do estudo – 6 pp no caso de maior diferença entre os casos. Deste modo confirma-se a bondade da proposta apresentada e a oportunidade de reduzir o número de ED (até ao momento um por turno e por mesa) e substituí-los por END, sendo o controlo e a possibilidade de reacção mais imediatos e evitando a espera prolongada por validação de lotes produzidos.

Os resultados das propostas apresentadas ao longo do estudo revelaram assim uma melhoria significativa no processo. Nas zonas onde é requerida a aplicação de adesivo – especialmente nas zonas de furação roscada – não é possível garantir a repetibilidade do processo de deposição de material. Como trabalho futuro seria interessante compilar um *handbook* com fotografias dos casos limite para os técnicos de qualidade terem consigo quando fazem o END e poderem ajuizar com critério se o lote é validado ou bloqueado.

É ainda uma mais valia o estudo, através de processos de metrologia e de uma máquina de medição de coordenadas, o estudo dos componentes de variados lotes com objectivo de perceber não apenas se estes estão em concordância com o que é especificado pelos desenhos, mas também aferir se o processo é capaz. Em última instância, tendo acesso prévio às medições dos lotes de componentes seria possível ajustar cada cordão de forma a otimizar a deposição de cola e, consequentemente, a rentabilidade do processo.

6 Referências

- [1] Groover, M.P., *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 4th ed., s.d., Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 1996
- [2] Pizzi A., Mittal K. L., Eds., *Handbook of adhesive technology*, 2nd ed., rev. And expanded. New York: M. Dekker, 2003.
- [3] Brockmann W., Geiß, P. L., Klingen J., Schröder B., *Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology*, Wiley-VCH, Weinheim, 2009
- [4] Budynas R.G., Nisbett J.K., *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 8th ed., McGraw-Hill, New York, 2006
- [5] Dilger K., Kreling S., *Adhesive bonding techniques for advance high-strength steels (AHSS)*, Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS), 167-179, 2015
- [6] Kwakernaak A., Hofstede J., Poulis J., Benedictus R., *Improvements in bonding metals (steel, aluminium)*, Delft University of Technology, The Netherlands, 2010
- [7] Müller M., Valášek P., Ruggiero A., D'Amato R., *Research on Influence of Loading Speed of Structural Two-component Epoxy Adhesives on Adhesive Bond Strength*, Procedia Engineering, 340-345, 2016
- [8] Mourão A. J. F., *Tolerâncias Geométricas - Interpretação, princípios e métodos de verificação*, Brochura da disciplina de Toleranciamento de Sistemas Mecânicos, FCT-UNL, 2004.
- [9] Watts D., *The "GD&T Knowledge Gap" In Industry*, ASME Conference Proceedings, 597-604, 2007.
- [10] Santos T. G., *Introdução aos Ensaios Não Destrutivos*, Apontamentos da disciplina de Processos Avançados de Fabrico e Ensaios Não Destrutivos, FCT-UNL, 2017